

Modelagem de Derrame de Óleo para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas

Revisão 02

Março/2016





TETRA TECH
Rua Fidalga, 711
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP 05432-070
<http://www.tetrattech.com>



BP Energy do Brasil Ltda.
Av. das Américas, 3434, Boloc 7 / Salas 301-308 - Barra da Tijuca
Rio de Janeiro – RJ
CEP 22640-102
www.bp.com

Modelagem de Derrame de Óleo para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas

Equipe Técnica TETRA TECH:

ANA CAROLINA R. LAMMARDO	(Oceanógrafa)
BRUNO A. D. PASSA	(Oceanógrafa)
CAROLINA YUMI YONAMINE	(Gestora Ambiental)
EDUARDO A. YASSUDA	(Engenheiro Mecânico)
GABRIEL CLAUZET	(Físico)
GLAUCO MATHEUS LOPES	(Oceanógrafa)
MARIANA LINO GOUVÊA	(Meteorologista)
PEDRO F. DE MORAES. SARMENTO	(Oceanógrafa)
RICARDO OZELLA BUSOLI	(Oceanógrafa)

Revisão 02
Março / 2016

A TETRA TECH é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da TETRA TECH como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da TETRA TECH for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da TETRA TECH”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a TETRA TECH.

TETRA TECH, 2016. Modelagem de Derrame de Óleo para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas. Relatório Técnico, Revisão 02 (22 de março 2016). 123pp+Anexos.



ÍNDICE GERAL

CONTROLE DE REVISÕES	3
ÍNDICE GERAL	5
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS	13
RESUMO.....	15
1. INTRODUÇÃO	17
2. MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO.....	20
2.1. Campos de Correntes	22
2.2. Campos de Vento	22
2.3. Ponto de Modelagem e Volumes de Derrame.....	23
2.4. Domínio Modelado e Batimetria	24
2.5. Características do Produto Utilizado	26
2.6. CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES.....	27
2.7. RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	29
3. RESULTADOS MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO	30
3.1. SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS	30
3.1.1. Volume Pequeno – 8 m ³	33
3.1.2. Volume Médio – 200 m ³	38
3.1.3. Volume de Pior Caso – 50.720,1m ³	45
3.2. SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS.....	61
3.2.1. Cenários Determinísticos Críticos – Menor Tempo	62
3.2.2. Cenários Determinísticos Críticos – Maior Massa	79
3.2.3. Cenários Determinísticos Críticos – Menor Distância da Costa.....	96
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5. BIBLIOGRAFIA	120
6. EQUIPE TÉCNICA.....	121
ANEXO A – DESCRIÇÃO DO MODELO OSCAR	A-1
ANEXO B – GRADE HABITAT	B-1
ANEXO C – MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	C-1

ANEXO D – TABELAS COM O RESUMO DOS RESULTADOS PROBABILÍSTICOS POR UNIDADE DE CONSERVAÇÃO D-1

ANEXO E – ANÁLISE DE FREQUÊNCIA PARA OS PERÍODOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS..... E-1



LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização do ponto de modelagem e Bloco BAR-M-346, na Bacia de Barreirinhas...17
- Figura 2** - Grade habitat definindo os contornos e tipos de costa para a modelagem de óleo, resolução de 2,3 km no eixo X e 1,5 km no eixo Y (dimensões de 2.300 km x 1.500 km).25
- Figura 3** - Curva de destilação do óleo GYDA 2000. Fonte: Modelo OSCAR.26
- Figura 4** - Cenário BAR_M_346_8_VER: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.34
- Figura 5** - Cenário BAR_M_346_8_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.35
- Figura 7** - Cenário BAR_M_346_8_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.36
- Figura 8** - Cenário BAR_M_346_8_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.37
- Figura 8** - Cenário BAR_M_346_200_VER: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.39
- Figura 9** - Cenário BAR_M_346_200_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.40
- Figura 10** - Cenário BAR_M_346_200_VER: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.41
- Figura 11** - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.42
- Figura 12** - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.43
- Figura 13** - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.44
- Figura 14** - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....47
- Figura 15** - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....48

Figura 16 – Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d’água (vista em planta e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão , com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.49

Figura 17 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....50

Figura 18 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Tempo mínimo de toque do óleo na costa (horas) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....51

Figura 19 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Massa máxima de óleo na costa (ton./km) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão , com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....52

Figura 20 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....54

Figura 21 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....55

Figura 22 – Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d’água (vista em planta e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.56

Figura 23 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....57

Figura 24 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Tempo mínimo de toque de óleo na costa (horas) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....58

Figura 25 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Massa máxima de óleo na costa (ton./km) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.....59

Figura 26 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER: Cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,10 m³ (contínuo por 30 dias).....65

Figura 27 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).....66

Figura 28 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d’água, do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um cenário ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).67

Figura 29 - Balanço massa para o cenário DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER.....68

Figura 30 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV: Cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,10 m ³ (contínuo por 30 dias).....	69
Figura 31 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).....	70
Figura 32 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, para um cenário ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).	71
Figura 33 - Balanço massa para o cenário DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV.	72
Figura 34 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-NE.	73
Figura 35 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.....	74
Figura 36 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.....	75
Figura 37 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.....	76
Figura 38 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.....	77
Figura 39 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-N; Vento-E.	78
Figura 40 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER: Cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,10 m ³ (contínuo por 30 dias).	82
Figura 41 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).....	83
Figura 42 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um cenário ocorrendo no bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).	84

Figura 43 - Balanço massa para o cenário DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER.	85
Figura 44 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV: Cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,10 m ³ (contínuo por 30 dias).	86
Figura 45 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).....	87
Figura 46 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, para um cenário ocorrendo no bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m ³ (contínuo por 30 dias).....	88
Figura 47 - Balanço massa para o cenário DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV.....	89
Figura 48 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.	90
Figura 49 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-ENE.....	91
Figura 50 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque de óleo na costa da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-E.....	92
Figura 51 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-WSW; Vento-ESE.....	93
Figura 52 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.....	94
Figura 53 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de primeiro toque na costa da determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-E; Vento-E.....	95
Figura 54 - DET_DIST_BAR_M_346_8_VER: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 8 m ³ (Instantâneo).....	98
Figura 55 - DET_DIST_BAR_M_346_8_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 8 m ³ (Instantâneo).	99
Figura 56 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_8_VER.	100

Figura 57 - DET_DIST_BAR_M_346_8_INV: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 8 m ³ (instantâneo).....	101
Figura 58 - DET_DIST_BAR_M_346_8_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 8 m ³ (Instantâneo).....	102
Figura 59 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_8_INV.....	103
Figura 60 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m ³ (Instantâneo).....	104
Figura 61 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 200 m ³ (Instantâneo).....	105
Figura 62 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um cenário ocorrendo no bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 200 m ³ (Instantâneo).....	106
Figura 63 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_200_VER.	107
Figura 64 - DET_DIST_BAR_M_346_200_INV: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m ³ (instantâneo).....	108
Figura 65 - DET_DIST_BAR_M_346_200_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m ³ (Instantâneo).....	109
Figura 66 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_200_INV.....	110
Figura 67 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m ³ , no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-NE.	111
Figura 68 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m ³ , no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.	112
Figura 69 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m ³ , no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.....	113
Figura 70 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m ³ , no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.....	114
Figura 71 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m ³ ,	

no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem.
Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.115

Figura 72 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-N; Vento-E.116



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros numéricos utilizados como input na modelagem de óleo.	21
Tabela 2 - Coordenadas geográficas do ponto de modelagem nos vértices dos blocos na Bacia de Barreirinhas (datum SIRGAS2000).	23
Tabela 3 - Características atribuídas à expectativa de óleo cru.	26
Tabela 4 - Composição do óleo GYDA 2000. Fonte: Banco de Dados do OSCAR.	27
Tabela 5 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrame de óleo para os Bloco BAR-M-346 na Bacia de Barreirinhas.	29
Tabela 6 - Extensão de toque na costa (km) e tempo mínimo de toque na costa (horas) as simulações probabilísticas no Bloco BAR-M-346.	31
Tabela 7 - Menor distância em relação à costa para os cenários probabilísticos sem toque na costa para as simulações probabilísticas no Bloco BAR-M-346.	31
Tabela 8 - Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para os municípios com probabilidade de toque, período de verão, com derrame de volume de 50.720,1 m ³ , para o Bloco BAR-M-346.	53
Tabela 9 - Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para os municípios com probabilidade de toque, período de inverno, com derrame de volume de 50.720,1 m ³ , para o Bloco BAR-M-346.	60
Tabela 10 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados ao menor tempo de toque na costa.	63
Tabela 11 - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.	63
Tabela 12 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados à maior massa de óleo na costa.	79
Tabela 13 - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.	81
Tabela 14 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados à menor distância do óleo em relação à costa.	96
Tabela 15 - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.	97



RESUMO

Este relatório apresenta a modelagem numérica do transporte de óleo no mar para a Bacia de Barreirinhas, localizada na região Nordeste Brasileira, para o Bloco Exploratório BAR-M-346.

O sistema de modelos OSCAR foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de óleo. O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D. O campo de ventos foi proveniente de dados de reanálise de modelo meteorológico.

De forma a contemplar um ano de base hidrodinâmica, foram conduzidas simulações probabilísticas para dois períodos de seis meses (janeiro a junho e julho a dezembro), a partir de um ponto de modelagem no vértice do bloco e três classes de derrame, como definido na Resolução do CONAMA nº 398/08: pequeno (8,0 m³), médio (200,0 m³) e volume de pior caso (50.720,1 m³ derramados ao longo de 30 dias, correspondente cenário de *blowout* de um poço). A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para cada um dos períodos, utilizando como critérios, o menor tempo e a maior massa de óleo que chega à costa.

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias após o final do vazamento. Adicionalmente, adotou-se a espessura mínima de 0,0003 mm na apresentação dos resultados para a superfície da água e concentração mínima de 51 ppb para os resultados na coluna d'água.

Os cenários com volumes pequeno e médio foram conduzidos considerando o vazamento a partir da superfície (afundamento de unidade), enquanto os cenários com volume de pior caso foram simulados a partir do fundo (*blowout* de fundo).

Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre as trajetórias das manchas simuladas e os padrões de circulação na região, com direções predominantes para oeste e noroeste. Existe probabilidade de toque na costa em ambos os períodos sazonais simulados, sendo o primeiro toque em 171 horas no Município de Santo Amaro do Maranhão (MA), no período de janeiro a junho. Para o período de julho a dezembro, o primeiro toque ocorreu em 239 horas em Humberto de Campos (MA).

O Parcel Manuel Luís e os Bancos do Álvaro e Tarol foram considerados para análises por seus limites como Unidades de Conservação. Assim, para ambos os períodos simulados, o Parcel de Manuel Luís apresentou o menor tempo de toque, sendo de 284 horas para o período de janeiro a junho; e 277 horas para o período de julho a dezembro.

Os resultados das simulações dos cenários determinísticos de menor tempo e maior massa mostraram que a biodegradação e a dispersão na coluna d'água foram os principais processos que atuaram na redução da massa de óleo na superfície da água nos cenários de pior caso. Além disso, processos intempéricos como a dissolução e a dispersão natural, regidos pela ação de ventos, correntes e marés na coluna d'água também foram fatores importantes na redução da massa de óleo na superfície da água ao final do período simulado.

Os cenários de 8 m³ e 200 m³ não apresentaram probabilidade de toque na costa considerando as espessuras iguais ou superiores a 0,0003 mm.



1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte à BP Energy do Brasil (BP) na elaboração dos estudos ambientais para as atividades de exploração na Bacia de Barreirinhas, apresenta-se, neste estudo, a modelagem numérica da trajetória e intemperismo de derrames de óleo no mar no Bloco BAR-M-346.

A Figura 1 apresenta a localização do Bloco BAR-M-346 e do ponto de modelagem para o qual foram realizadas as simulações numéricas de potenciais acidentes com derrame de óleo, na Bacia de Barreirinhas.

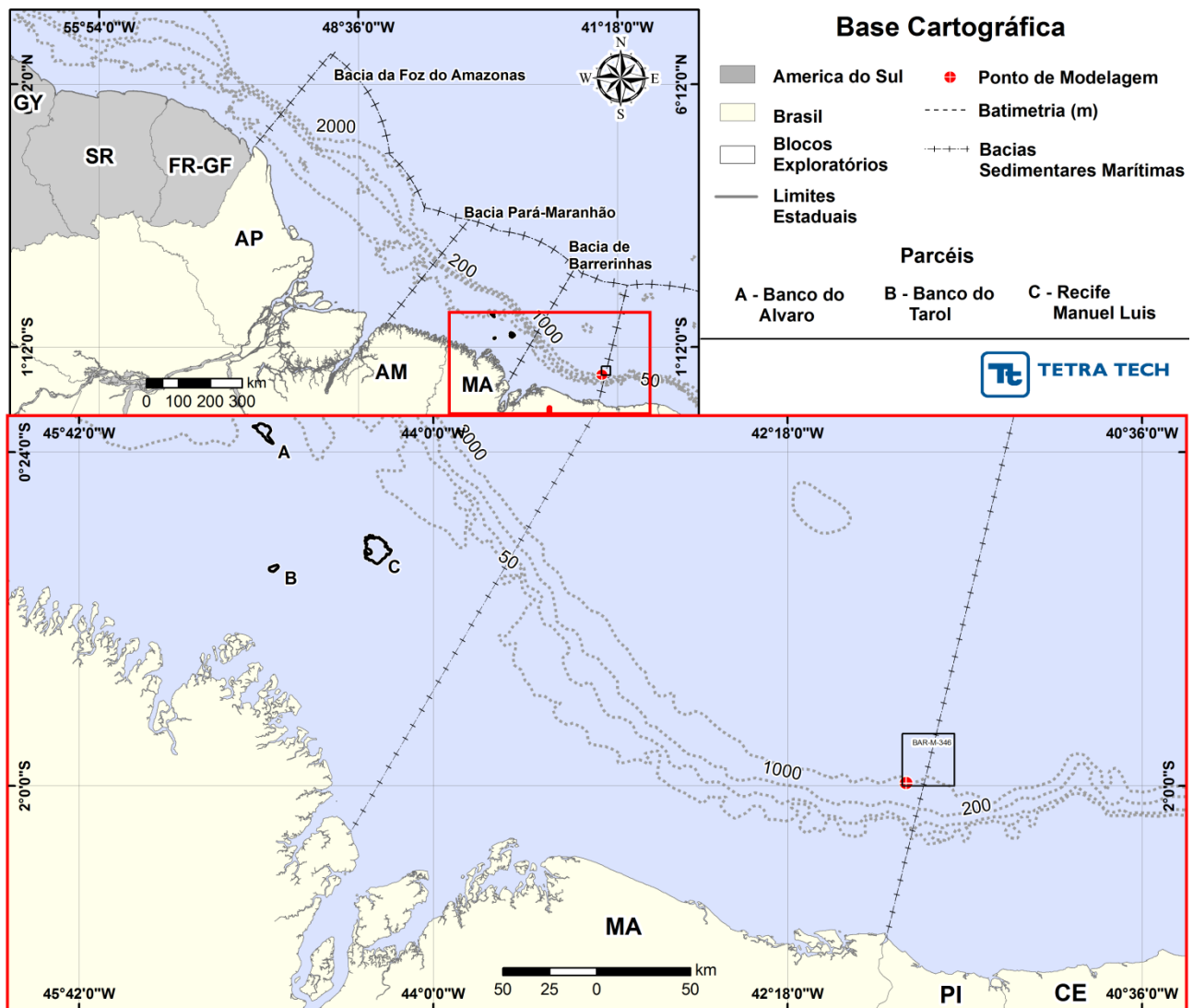


Figura 1 - Localização do ponto de modelagem e Bloco BAR-M-346, na Bacia de Barreirinhas.

A modelagem foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OSCAR¹, desenvolvido pela SINTEF². Para estudos de modelagem como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em grande escala, (c) campos de vento variáveis no tempo e no espaço e (d) caracterização físico-química do produto.

Para a modelagem de dispersão da mancha de óleo foram utilizados dados de reanálise de vento do CFSR³, distribuídos pelo NCDC/NCAR⁴. O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D, implementado pelo grupo TETRA TECH na Região Norte-Nordeste Brasileira.

Nas simulações de derrame de óleo considerou-se um ponto de modelagem, três volumes de derrame (pequeno, médio e pior caso) e um ano de base hidrodinâmica (dois períodos de seis meses, sendo cinco meses para o sorteio do instante inicial + 30 ou 60 dias de simulação, dependendo do volume vazado). Como critério de parada nas simulações de derrame de óleo utilizou-se o tempo de 30 dias após o final do vazamento. Adicionalmente, adotou-se a espessura mínima de 0,0003 mm na apresentação dos resultados para a superfície da água e concentração mínima de 51 ppb para os resultados na coluna d'água.

A partir dos resultados das simulações probabilísticas, foram selecionados os cenários determinísticos críticos utilizando como critério o menor tempo de toque na costa e a maior massa de óleo na costa.

A seguir, o Capítulo 2 descreve os cenários acidentais de óleo, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas críticas são apresentados no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta as considerações finais para o presente estudo.

¹ *Oil Spill Contingency and Response.*

² *Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning: Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial*

³ *NCEP Climate Forecast System Reanalysis* ou (ou Reanálise do Sistema de Previsão Climática); última data de acesso: janeiro de 2015.

⁴ *National Climatic Data Center / National Center for Atmospheric Research.*



Em complementação, no Anexo A apresenta-se a descrição do modelo OSCAR e no Anexo B, a descrição da modelagem hidrodinâmica implementada para a Bacia de Barreirinhas. A grade *habitat* em tamanho A3 encontra-se no Anexo C.

O Anexo D apresenta, na forma de tabelas, um resumo dos resultados probabilísticos por Unidade de Conservação. Por fim, no Anexo E são apresentadas as análises de frequência de vento e corrente na região do ponto de modelagem, para os períodos das simulações determinísticas.

2. MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Na modelagem de derrame de óleo cru foi utilizado o modelo OSCAR, desenvolvido pela SINTEF, uma ferramenta que representa os principais processos de intemperismo e trajetória do óleo na superfície e coluna d'água. A descrição mais detalhada deste modelo encontra-se no Anexo A.

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- ✓ Localização geográfica do ponto de vazamento;
- ✓ Volume/Vazão do vazamento;
- ✓ Duração da simulação;
- ✓ Tipo de óleo;
- ✓ Linha de costa;
- ✓ Batimetria;
- ✓ Grade *habitat* / tipo de ambiente (por exemplo, manguezais, áreas alagáveis, praias);
- ✓ Campo de corrente;
- ✓ Campo de vento;
- ✓ Temperatura do ar e do mar;
- ✓ Parâmetros de simulação (por exemplo. número de partículas, número de camadas verticais, número de simulações determinísticas que compõe cada cenário probabilístico, passo de tempo, intervalo de saída, fator de vento, entre outros).

Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados como dado de entrada na modelagem de derrame de óleo.

Na modelagem foram considerados todos os processos de intemperismo descritos no Anexo A, exceto a interação do óleo com sedimentos em suspensão (a justificativa é apresentada no mesmo anexo). Ressalta-se que o diâmetro das gotículas de óleo é calculado internamente pelo modelo OSCAR (Equação 19, Anexo A).

**Tabela 1 - Parâmetros numéricos utilizados como input na modelagem de óleo.**

PARÂMETROS	VALOR UTILIZADO NO MODELO (OSCAR)	
Coordenadas do Ponto de Modelagem	01°59'12,25" S / 041°43'50,47" W (item 2.3)	
Volumes de Vazamento	Pequeno (8 m ³)	
	Médio (200 m ³)	
	Pior Caso (50.720,1 m ³)	
Duração do Vazamento	Instantâneo (pequeno e médio) / 30 dias (pior caso)	
Duração da Simulação	30 dias (pequeno e médio) / 60 dias (pior caso)	
Profundidade do Derrame	Superfície (pequeno e médio) / Fundo ou 1.900 m (pior caso)	
Passo de Tempo	60 minutos	
Intervalo de Saída (<i>Output</i>)	60 minutos	
Tipo de Óleo	Óleo cru API 29 (ver Item 2.5)	
Linha de Costa e Batimetria	Ver Item 2.4	
Resolução Horizontal da Grade <i>Habitat</i>	2,3 km no eixo X e 1,5 km no eixo Y	
Número de Camadas na Vertical	7	
Temperatura da água (°C)*	Janeiro a Junho	Julho a Dezembro
	3,3 (fundo) / 25,0 (superfície)	3,3 (fundo) / 20,0 (superfície)
Temperatura do ar (°C)**	Janeiro a Junho	Julho a Dezembro
	30	25
Número de Partículas (Superfície e Dissolvidas) ***	3.000 (pequeno)	
	6.000 (médio)	
	12.000 (pior caso)	
Volume de Cada Partícula (Superfície)	0,003 m ³ (volume pequeno)	
	0,033 m ³ (volume médio)	
	4,22 m ³ (volume de pior caso)	
Fator de deriva do vento (%)	3,5	

* valores médios de temperatura na profundidade do ponto de modelagem obtidos a partir de dados do NOAA⁵.

** valores médios para a área de estudo, obtidos a partir do CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*); produto do centro norte-americano NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) com resolução espacial de 0,3° e temporal de 1 hora.

* Os valores de partículas apresentados correspondem aos valores aplicados para superfície e os valores aplicados para a coluna d'água de forma independente. Ou seja, não corresponde ao somatório dos valores da superfície com os valores da coluna d'água - foi adotado o mesmo número de partículas para a coluna d'água. Apesar do número máximo de partículas permitido pelo modelo OSCAR ser 30.000, só foi possível a utilização de 12.000 partículas em superfície e 12.000 partículas dissolvidas (coluna d'água) sem o modelo apresentar o erro "crash" descrito no Anexo A.

⁵ *National Oceanographic Data Center. Conjunto de dados fornecidos pela NOAA. Disponível em: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/qd_ts01.html>. Último acesso em: 18 de novembro de 2014.*

Os subitens seguintes apresentam detalhes sobre os dados de entrada como campos de corrente e vento, batimetria, domínio modelado, localização do ponto de modelagem, volume de derrame, características do óleo, critérios de parada adotados nas simulações e um resumo dos cenários simulados.

2.1. Campos de Correntes

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte de óleo foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica implementada com o Delft3D-FLOW, pela TETRA TECH, na região Norte-Nordeste Brasileira, para representar a complexa dinâmica costeira, sua interação com a plataforma e regiões profundas (Anexo B). O modelo de larga escala HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*) foi acoplado ao Delft3D para garantir a representação, em águas profundas, do grande domínio espacial necessário à modelagem de deriva de óleo.

A definição dos períodos de simulação da modelagem hidrodinâmica, e também de deriva de óleo, teve em vista atender aos critérios de sazonalidade identificados no diagnóstico de meio físico, que aponta como dominante a influência do deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a variação intra-anual dos parâmetros ambientais, sendo que este sistema tem seu posicionamento ao sul do Equador nos períodos de verão e outono, afastando-se para o Hemisfério Norte no inverno e primavera. Desta forma, foram determinados dois períodos para realização das modelagens: janeiro a junho (representativo dos períodos de verão e outono, denominado apenas como “verão” na sequência deste relatório) e julho a dezembro (representativo dos períodos de inverno e primavera, denominado apenas como “inverno” na sequência deste relatório).

2.2. Campos de Vento

Para caracterização do regime de ventos na região de estudo foi utilizado um conjunto de dados de vento variável no tempo e no espaço, proveniente de reanálise do CFSR (SAHA *et al.*, 2010). É um produto gerado pelo NCEP e distribuído pelo NCDC,



consistindo de um conjunto de assimilação de dados que acopla os sistemas oceano-superfície-atmosfera e continente-gelo, em escala global e em alta resolução.

O CFSR difere de outros produtos de reanálise pelo acoplamento entre o oceano e a atmosfera, por ter um modelo interativo de gelo marinho e, também, por assimilar dados de satélites através de um esquema de interpolação estatística. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo assim seus efeitos sobre o sistema climático terrestre.

Neste estudo foram usados ventos a 10 m de altitude do banco de dados CFSR, com resolução espacial de 0,3° e resolução temporal horária, referentes ao ano de 2014.

2.3. Ponto de Modelagem e Volumes de Derrame

O ponto de modelagem foi selecionado de forma a representar um poço exploratório no vértice do Bloco BAR-M-346, localizado na Bacia de Barreirinhas.

A Tabela 2 lista o ponto considerado na modelagem, suas coordenadas geográficas (SIRGAS 2000) e a lâmina d'água local (em metros).

Tabela 2 - Coordenadas geográficas do ponto de modelagem nos vértices dos blocos na Bacia de Barreirinhas (datum SIRGAS2000).

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA* (m)
BAR-M-346	01°59'12,25" S	041°43'50,47" W	1.900,0

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008):

- Pequeno: 8,0 m³ (referente ao cenário de descarga pequena);
- Médio: 200,0 m³ (referente ao cenário de descarga média); e
- Pior caso: 50.720,1m³ (referente ao cenário de descarga de pior caso).

Dada a escassez de dados geológicos e de engenharia do petróleo na região do setor SBAR-AP2, Bacia de Barreirinhas, o volume de pior caso específico consiste numa estimativa preliminar, baseada em dados disponíveis de poços previamente perfurados em outros setores da Bacia de Barreirinhas, aplicável à área do Bloco BAR-M-346. Informações adicionais são apresentadas no ítem “II.5.1.3.2 Geologia Local” do Estudo de Impacto Ambiental-EIA.

Esse volume foi definido como correspondente ao *blowout* de um poço ao longo de 30 dias, segundo a Resolução CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008).

Portanto, nas simulações de pior caso, o derrame de todo o volume foi considerando o fluxo diário ao longo de 30 dias.

Nas simulações realizadas com os volumes pequeno (8,0 m³) e médio (200,0 m³) considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

Todos os vazamentos com volumes pequeno e médio foram conduzidos considerando-se um vazamento a partir da superfície, em função da existência de cenários acidentais para estes volumes somente nesta área; enquanto os vazamentos de pior caso (*blowout*) foram realizados a partir do fundo, pois foi considerado o cenário mais crítico.

2.4. Domínio Modelado e Batimetria

Na modelagem de óleo foi utilizado o mesmo conjunto de dados batimétricos do modelo hidrodinâmico integrando informações fornecidas pelo cliente e do banco de dados da TETRA TECH.

O domínio da modelagem de óleo foi definido pela grade *habitat*⁶, apresentada na Figura 2, com dimensões de 1.000 x 1.000 células (máxima quantidade permitida pelo modelo OSCAR). A resolução espacial é de 2,3 km no eixo X e 1,5 km no eixo Y. A figura da grade *habitat* também é reproduzida em tamanho A3 no Anexo C.

Para a definição dos tipos de costa adotados neste estudo, foi inicialmente realizado um levantamento dos possíveis tipos encontrados na região. Posteriormente, foi realizado

⁶ Grade que define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa.

um balizamento entre estas informações levantadas com os tipos de costa disponíveis no modelo de óleo.

Com relação à discretização das camadas verticais no modelo OSCAR, foram adotadas 7 camadas para os cenários de todos os pontos de modelagem. Este valor correspondeu ao número máximo de camadas que o modelo “suportou” sem apresentar erros de processamento no modo probabilístico.

Neste modelo as camadas verticais são distribuídas igualmente ao longo da coluna d’água, considerando a profundidade máxima, com exceção da primeira camada, que sempre abrange os primeiros 2 m da coluna d’água abaixo da superfície. Assim, a primeira camada superficial possui espessura de 2 m e as demais possuem, aproximadamente, 271 metros (1.898 m divididos em 6 camadas).

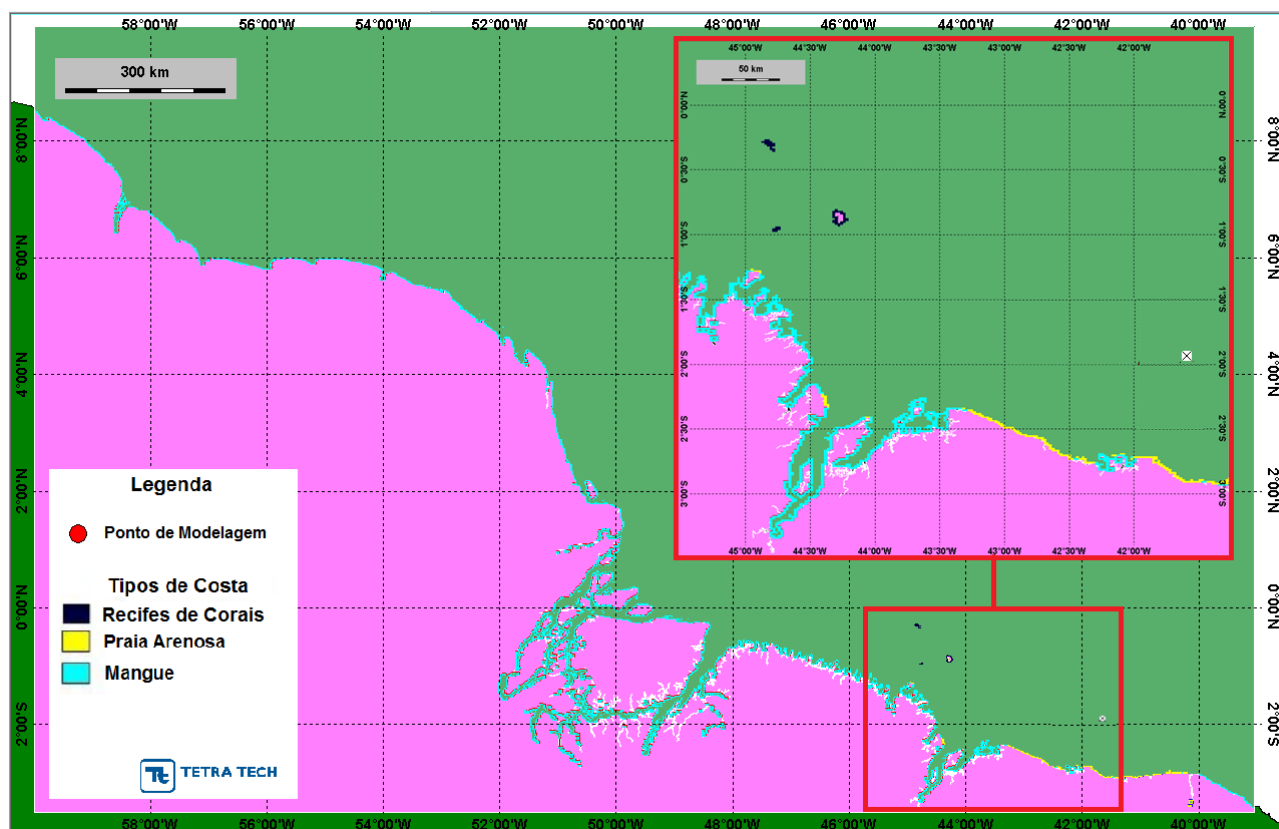


Figura 2 - Grade habitat definindo os contornos e tipos de costa para a modelagem de óleo, resolução de 2,3 km no eixo X e 1,5 km no eixo Y (dimensões de 2.300 km x 1.500 km).

2.5. Características do Produto Utilizado

A Tabela 3 apresenta as informações fornecidas pela BP, a partir das quais foi localizado um óleo similar no banco de dados do OSCAR, utilizado nas simulações de derrame de óleo, trocando apenas as informações por estas fornecidas (Tabela 3). A Figura 3 mostra a curva de destilação gerada internamente pelo modelo OSCAR, enquanto a Tabela 4 apresenta a composição do óleo proveniente do banco de dados do OSCAR.

Tabela 3 - Características atribuídas à expectativa de óleo cru.

PARÂMETROS	VALORES
Nome do Óleo	Óleo Cru
Grau API	29
Densidade a 20°C (g/cm ³)	0,828
Viscosidade a 25°C (cP)	0,9
Ponto de Fluidez (°C)	- 15,0*

* Banco de dados do modelo OSCAR (óleo GYDA 2000).

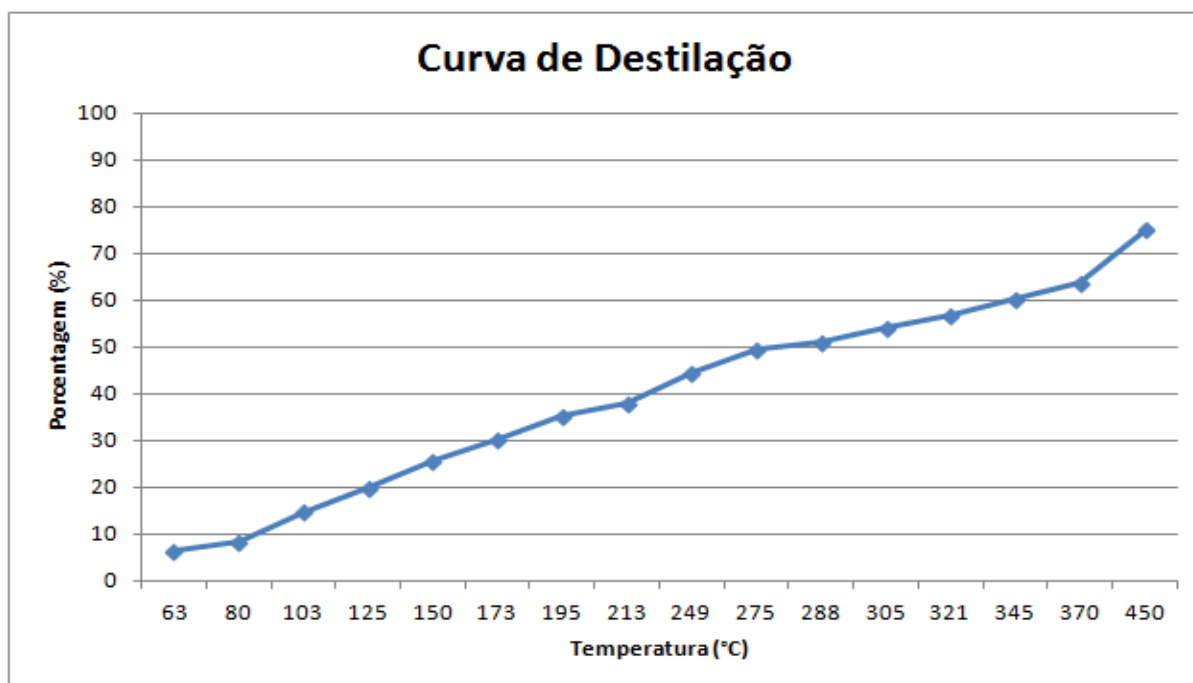


Figura 3 - Curva de destilação do óleo GYDA 2000. Fonte: Modelo OSCAR.

**Tabela 4 - Composição do óleo GYDA 2000. Fonte: Banco de Dados do OSCAR.**

NOME DO COMPONENTE	FRAÇÃO NO ÓLEO (%)
C1-C4 – gases (dissolvido no óleo)	1,8284
C5 – saturados (n-iso/cyclo)	2,9175
C6 – saturados (n-iso/cyclo)	1,6171
Benzeno	0,5040
C7 – saturados (n-iso/cyclo)	4,8766
C1 – Benzeno (Tolueno) et. B	0,9650
C8 – saturados (n-iso/cyclo)	3,8037
C2 – Benzeno (Xilenos, usando O-Xileno)	1,0387
C9 – saturados (n-iso/cyclo)	4,2328
C3 - Benzeno	4,3645
C10 – saturados (n-iso/cyclo)	4,3488
C4 e C4 Benzenos	0,1500
Naftalenos 2 (C2-C3 - alquilado)	0,3039
C15-C16 (saturados + aromáticos totais)	1,3357
HPA 1 (hidrocarbonetos poliaromáticos de solubilidade média)	3,5241
C17-C18 (saturados + aromáticos totais)	2,5917
C19-C20 (saturados + aromáticos totais)	3,3191
Materiais Cromatográficos Não -resolvidos	4,1209
C21-C25 (saturados + aromáticos totais)	2,4511
HPA 2 (hidrocarbonetos poliaromáticos de solubilidade baixa)	0,1062
C25+ (total)	36,9586

2.6. CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

Para atendimento do Termo de Referência CGPEG/DILIC/IBAMA nº 30/2014, as simulações foram interrompidas quando o tempo de simulação completou 30 dias após o final do vazamento. Ou seja, nos casos de derrames com volume de pior caso (derrame contínuo por 30 dias), a duração total das simulações foi de 60 dias. Para os volumes pequeno e médio (cujos regimes de derrame foram considerados instantâneos) a duração total das simulações foi de 30 dias.

Adicionalmente, o Termo de Referência 30/2014 solicita que a espessura mínima de existência de óleo em superfície não deve ultrapassar a espessura de iridescência (0,0003 mm). Sendo assim, foi adotado o corte de 300 nm na apresentação dos resultados.

Para o acompanhamento da pluma do óleo na coluna d'água foi definido um valor limite de concentração total (dissolvido e particulado) de 51 ppb. A adoção de limites para o acompanhamento do óleo tanto na coluna d'água quanto na superfície, busca evitar a apresentação de resultados que podem ser considerados puramente matemáticos e distantes da realidade.

Este valor limite adotado corresponde a concentração do Benzeno, que é um dos hidrocarbonetos presente no óleo definido na Resolução do CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) para águas salinas de Classe 1 (regiões de pesca ou cultivo de organismos para fins de consumo intensivo).

Ressalta-se, também, que este corte não está relacionado a potenciais limites toxicológicos do óleo sobre os organismos, e que existe, nas legislações, outras referências que poderiam ser utilizadas. Assim, o parâmetro utilizado neste estudo foi definido tecnicamente com base em legislações vigentes, uma vez que não existe uma referência especificada no TR.

Dentre outras fontes que poderiam ser utilizadas, pode-se citar, por exemplo, o documento Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA N°01/11 que apresenta um valor limite de concentração de TOG (teor de óleo e água) de 15 ppm (15.000 ppb) para a concentração em despejos autorizados de efluentes oleosos.

De acordo com a própria Resolução do CONAMA 357/2005, existem outros componentes que podem ser correlacionados com o óleo, como o Tolueno, e alguns HPAs (benzo(a)antraceno e benzo(a)pireno), cujos valores variam desde acima do padrão escolhido até muito próximo ao limite numérico do modelo. No entanto, reforça-se que nenhum destes componentes do óleo isoladamente respondem pela concentração total da carga oleosa e sim a uma fração dela, o que permitiu a inferência por um destes parâmetros. Assim, a opção pelo benzeno se deu em função de sua fração significativa na composição do óleo esperado e pela existência de um limite legal.



2.7. RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações probabilísticas foram realizadas considerando dois períodos de seis meses: verão e inverno⁷, para atendimento do Termo de Referência CGPEG/DILIC/IBAMA nº 30/14.

Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada uma série de 600 simulações em cada cenário probabilístico. O número de simulações é definido através de testes de sensibilidade realizados com este modelo, a fim de garantir a incorporação das variabilidades das forçantes oceanográficas e meteorológicas da área de estudo, considerando os recursos computacionais disponíveis e o tempo para execução do trabalho.

Os instantes iniciais de todo o conjunto de simulações determinísticas que compõem os cenários probabilísticos são definidos automaticamente pelo modelo, através da seleção das datas de início espaçadas regularmente no tempo ao longo do período sazonal definido. Desta forma, todas as simulações probabilísticas apresentam um mesmo conjunto de datas de início dos derrames e as datas de início não se repetem.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos cenários simulados neste estudo.

Tabela 5 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrame de óleo para os Bloco BAR-M-346 na Bacia de Barreirinhas.

CENÁRIO	PRODUTO	VOLUME (m ³)	LOCALIZAÇÃO DA FONTE	DURAÇÃO DO DERRAME	TEMPO DE SIMULAÇÃO	PERÍODO DE SIMULAÇÃO
BAR_M_346_8_VER	Óleo Cru	8,0	Superfície	Instantâneo	30 dias	Verão
BAR_M_346_8_INV	Óleo Cru	8,0	Superfície	Instantâneo	30 dias	Inverno
BAR_M_346_200_VER	Óleo Cru	200,0	Superfície	Instantâneo	30 dias	Verão
BAR_M_346_200_INV	Óleo Cru	200,0	Superfície	Instantâneo	30 dias	Inverno
BAR_M_346_PC_VER	Óleo Cru	50.720,1	Fundo	Contínuo (30 dias)	60 dias	Verão
BAR_M_346_PC_INV	Óleo Cru	50.720,1	Fundo	Contínuo (30 dias)	60 dias	Inverno

⁷ Como os cenários são simulados por 30 ou 60 dias, dependendo do volume de derrame. Na modelagem de cada período o sorteio das datas de início inclui os primeiros cinco meses em cada, ou seja, janeiro a maio + 30 ou 60 dias de simulação e julho a novembro + 30 ou 60 dias de simulação.

3. RESULTADOS MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações probabilísticas, determinísticas críticas para potenciais derrames de óleo a partir do Bloco BAR-M-346 da BP na Bacia de Barreirinhas. Todos os resultados são apresentados considerando os critérios de corte na espessura e na concentração já apresentados.

Ressalta-se que, dentro do modelo OSCAR, os resultados para o óleo na superfície da água, na coluna d'água e na costa são calculados de forma segregada. Ou seja, a partícula do óleo pode ser transferida entre cada compartimento, mesmo que a espessura esteja abaixo do valor de corte do compartimento de origem. Assim, caso uma partícula do óleo na superfície da água com valor abaixo do corte atinja a costa, o toque será computado.

Para a melhor interpretação dos resultados e coerência entre os mesmos, foi realizado um balizamento da extensão de toque na costa (tanto em resultados probabilísticos quanto em determinísticos) a partir dos resultados gerados, com corte de espessuras, para a superfície da água.

Cabe ressaltar que, em nenhuma das simulações realizadas, levaram-se em consideração ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Emergência Individual.

3.1. SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

O modelo OSCAR foi utilizado para simular os cenários descritos no Item 0 e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo.

A Tabela 6 mostra um resumo dos resultados probabilísticos, incluindo a extensão de costa com probabilidade de ser atingida, a maior probabilidade de toque de óleo na costa, o menor tempo de toque e o município de primeiro toque. Observa-se que a maior extensão de costa com probabilidade de chegada de óleo ocorreu durante o período de julho a dezembro (1.120,86 km), enquanto o menor tempo de toque na costa (171 horas – Santo Amaro do Maranhão) ocorreu no período de janeiro a junho.



A Tabela 7 mostra a menor distância dos contornos de probabilidade em relação à costa para os cenários sem probabilidade de toque, sendo de 23,3 km no período de janeiro a junho e 55,6 km no período de julho a dezembro, ambos em relação ao município de Água Doce do Maranhão (MA).

Vale ressaltar que todas as análises de interação com a linha de costa dos municípios e unidades de conservação foi elaborada com base nos resultados de óleo na costa e/ou superfície da água. Como não há uma saída do modelo que apresente informações diretas de interações da coluna d'água com as células de costa submersas, não foi realizada nenhuma análise para este compartimento (coluna d'água)⁸.

Tabela 6 - Extensão de toque na costa (km) e tempo mínimo de toque na costa (horas) as simulações probabilísticas no Bloco BAR-M-346.

CENÁRIO	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)	TEMPO DE TOQUE NA COSTA (horas)	MUNICÍPIO DE PRIMEIRO TOQUE
BAR_M_346_PC_VER	860,24	171	Santo Amaro do Maranhão (MA)
BAR_M_346_PC_INV	1.120,86	239	Humberto de Campos (MA)

OBS: os valores de extensão são aproximados devido à configuração/reentrâncias na linha de costa na área de estudo.

Tabela 7 - Menor distância em relação à costa para os cenários probabilísticos sem toque na costa para as simulações probabilísticas no Bloco BAR-M-346.

CENÁRIO	MENOR DISTÂNCIA DO ÓLEO EM RELAÇÃO A COSTA (km)
BAR_M_346_8_VER	48,2 (Araiozes – MA)
BAR_M_346_8_INV	60,1 (Água Doce do Maranhão – MA)
BAR_M_346_200_VER	23,3 (Água Doce do Maranhão – MA)
BAR_M_346_200_INV	55,6 (Água Doce do Maranhão – MA)

⁸ Não é possível visualizar, na coluna d'água, as parcelas de óleo particulado e dissolvido separadamente.

Observou-se que, em ambos os períodos sazonais, o tempo de afloramento do óleo na superfície foi de 6 horas para os cenários de volume de Pior Caso, cujo derrame ocorre no fundo do mar.

A seguir, são apresentados os resultados das simulações de forma gráfica com os intervalos de probabilidade da ocorrência de óleo na superfície, na coluna d'água e na costa, além da massa máxima de óleo na costa. Na sequência, são apresentados também os tempos de deslocamento do óleo na superfície da água.

Os resultados da massa máxima do óleo na costa representam o maior valor de massa identificado na costa para cada ponto de grade, obtido ao longo de todas as simulações que compuseram o resultado probabilístico. Os resultados apresentados nas tabelas são apresentados para cada célula, em massa (ton.) por distância (km). Uma vez que o modelo OSCAR disponibiliza apenas informações de massa por célula, para a obtenção dos valores de massa por km, foi realizado o cálculo considerando o valor de massa por célula dividido pela distância diagonal desta⁹. Nas figuras os resultados são apresentados em segmentos de mesmo valor (ton./km), e não em célula.

Em todas as ilustrações de intervalos de probabilidade de óleo superfície da água, na coluna d'água e na costa, apresentadas a seguir, o valor correspondente ao limite superior dos intervalos da escala de cores está incluído na classe. Assim, por exemplo, no intervalo de probabilidade de 10-20% estão incluídas as probabilidades superiores a 10% e menores ou iguais a 20%.

As ilustrações dos contornos de tempo correspondem ao tempo mínimo de deslocamento de óleo na água calculado (para cada posição da grade) entre todos os cenários determinísticos que compõem o cenário probabilístico. Nestas ilustrações são apresentados os tempos de 2, 6, 12, 36 e 60 horas após o início do derrame, selecionados de acordo com o tempo máximo para a disponibilização de recursos de resposta ao local da ocorrência da descarga, especificados na Resolução do CONAMA no 398/08 (BRASIL, 2008). Para tempos superiores a estes, foram selecionados intervalos que melhor se adequaram à visualização da evolução dos derrames na área de estudo (120, 240, 480, 720, 1.440 horas).

As escalas de cores adotadas foram selecionadas de forma a permitir uma melhor diferenciação dos intervalos de probabilidade e tempo escolhidos.

⁹ Célula da grade *habitat*: 2,3 km x 1,5 km (diagonal de 2,7 km).



Após a apresentação das figuras, conforme solicitado no Termo de Referência (CGPEG/DILIC/IBAMA Nº 30/14) deste estudo, são apresentados as tabelas de estatísticas da chegada do óleo nos municípios, estuários e baías. Para isto, uma vez que não foi identificado a probabilidade de toque nos estuários e baías com tempo de até 60 horas, foi assumido os valores de toque (menor tempo de toque na costa, maior probabilidade e maior massa de óleo) identificados na região de entrada dos mesmos como toque no interior.

Ressalta-se que, com relação ao toque nos estuários e baías, caso todos os municípios contidos na região interna destas feições já apresentem a probabilidade de toque no seu litoral, a respectiva feição não é apresentada na tabela.

Desta forma, nas tabelas são apresentadas as baías/estuários com presença de óleo no seu interior (Baía do Cumã, Baía de São Marcos e Baía do Arraial).

3.1.1. Volume Pequeno – 8 m³

A seguir, são apresentados os resultados individuais referentes às simulações com vazamento de volume pequeno, cujo vazamento foi considerado a partir da superfície.

Considerando o critério de corte adotado para a apresentação de resultados na superfície do mar (0,0003 mm), em atendimento ao Termo de Referência 30/14, não existe probabilidade de toque na costa para os cenários simulados em ambos os períodos. Como pode ser observado, o óleo ficou contido apenas na camada superficial (0 a 2 m). Considerando o critério de corte de 51 ppb adotado para a coluna d'água, os cenários de volume pequeno não apresentaram probabilidade de presença de óleo em nenhuma camada abaixo da superfície.

As menores distâncias de uma mancha em relação à costa ocorreram para o Estado do Maranhão, sendo de 48,2 km do Município de Araisos no período de verão e 60,1 km do Município de Água Doce do Maranhão no período de inverno.

As figuras a seguir, apresentam os resultados das simulações probabilísticas.

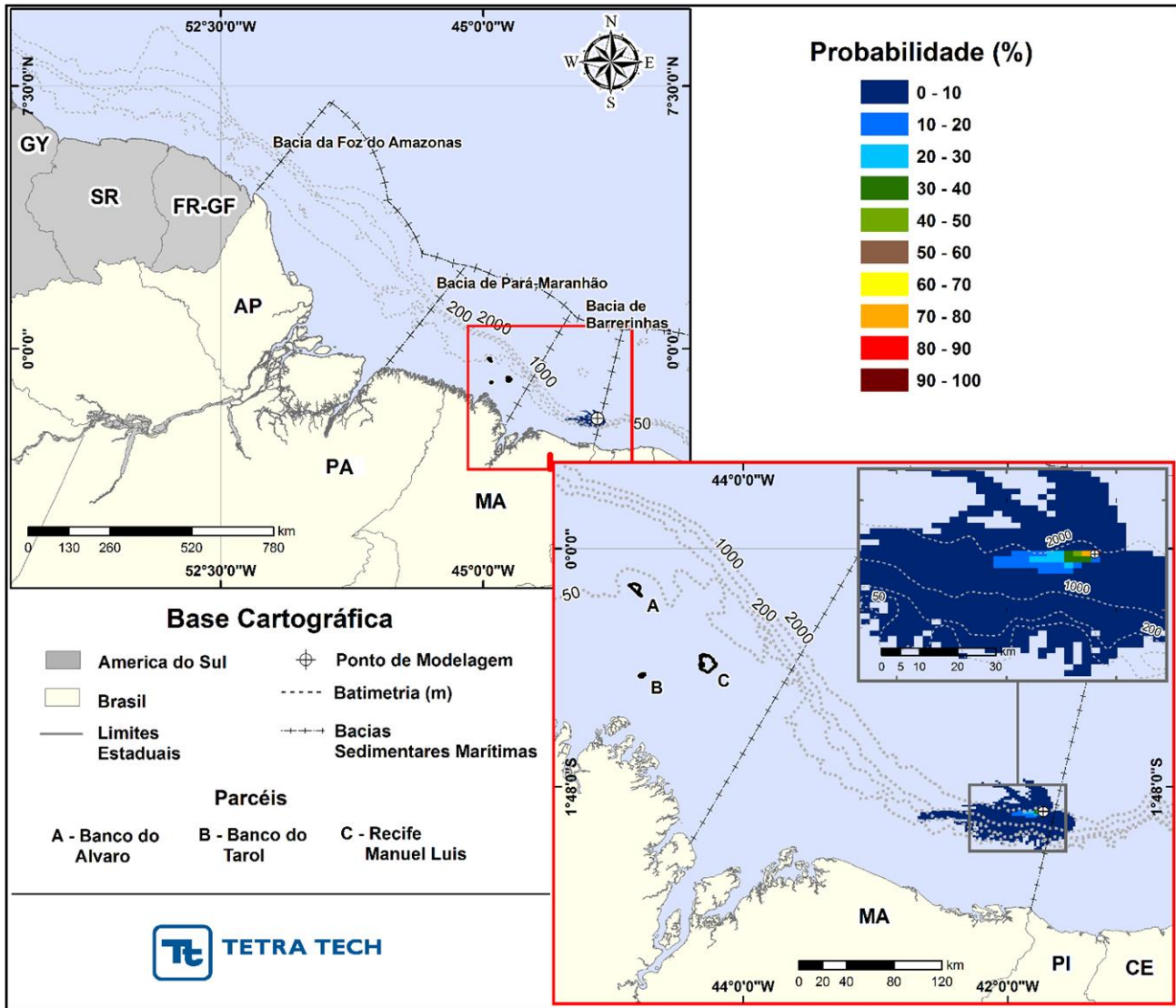


Figura 4 - Cenário BAR_M_346_8_VER: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 8 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

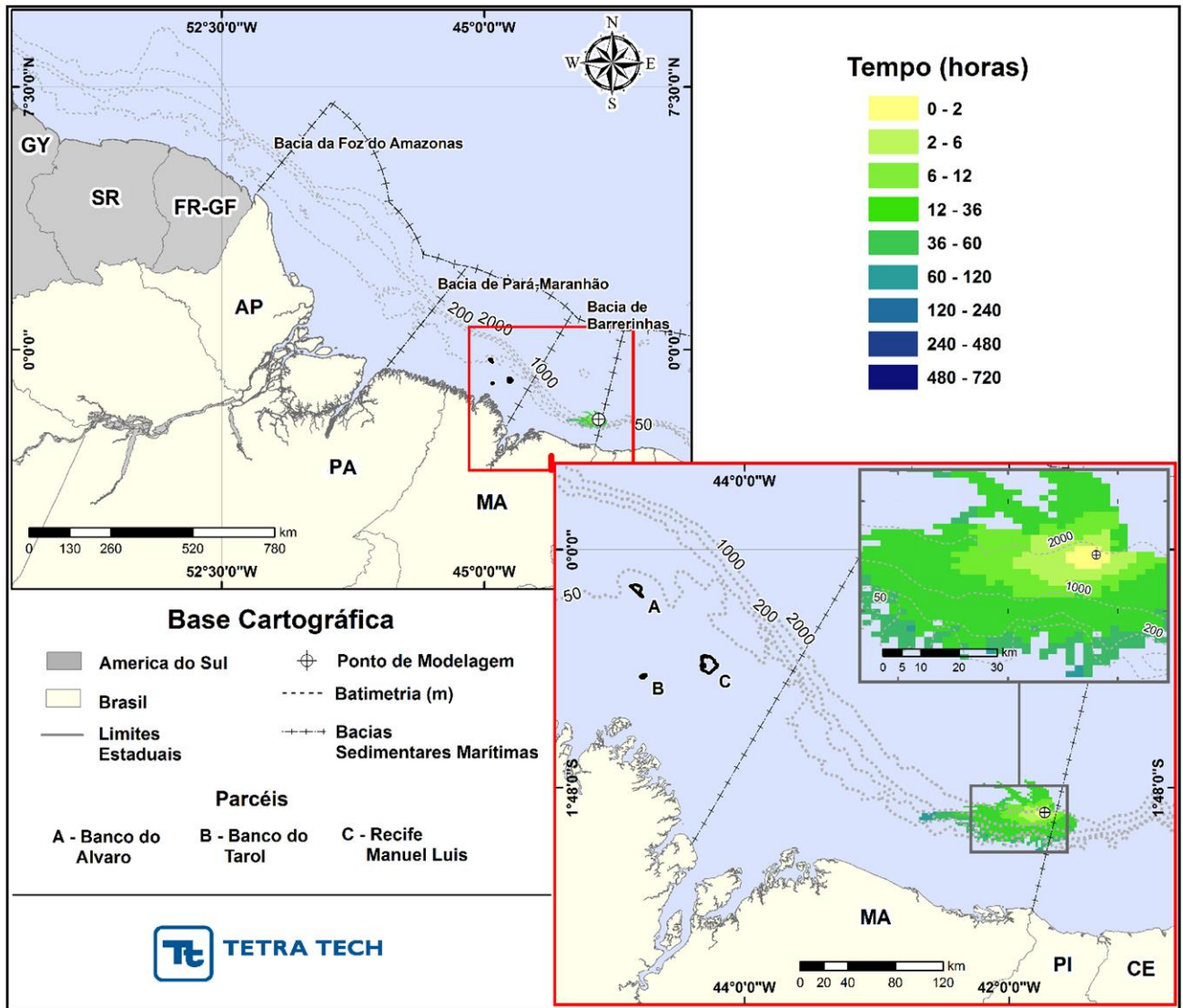


Figura 5 - Cenário BAR_M_346_8_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

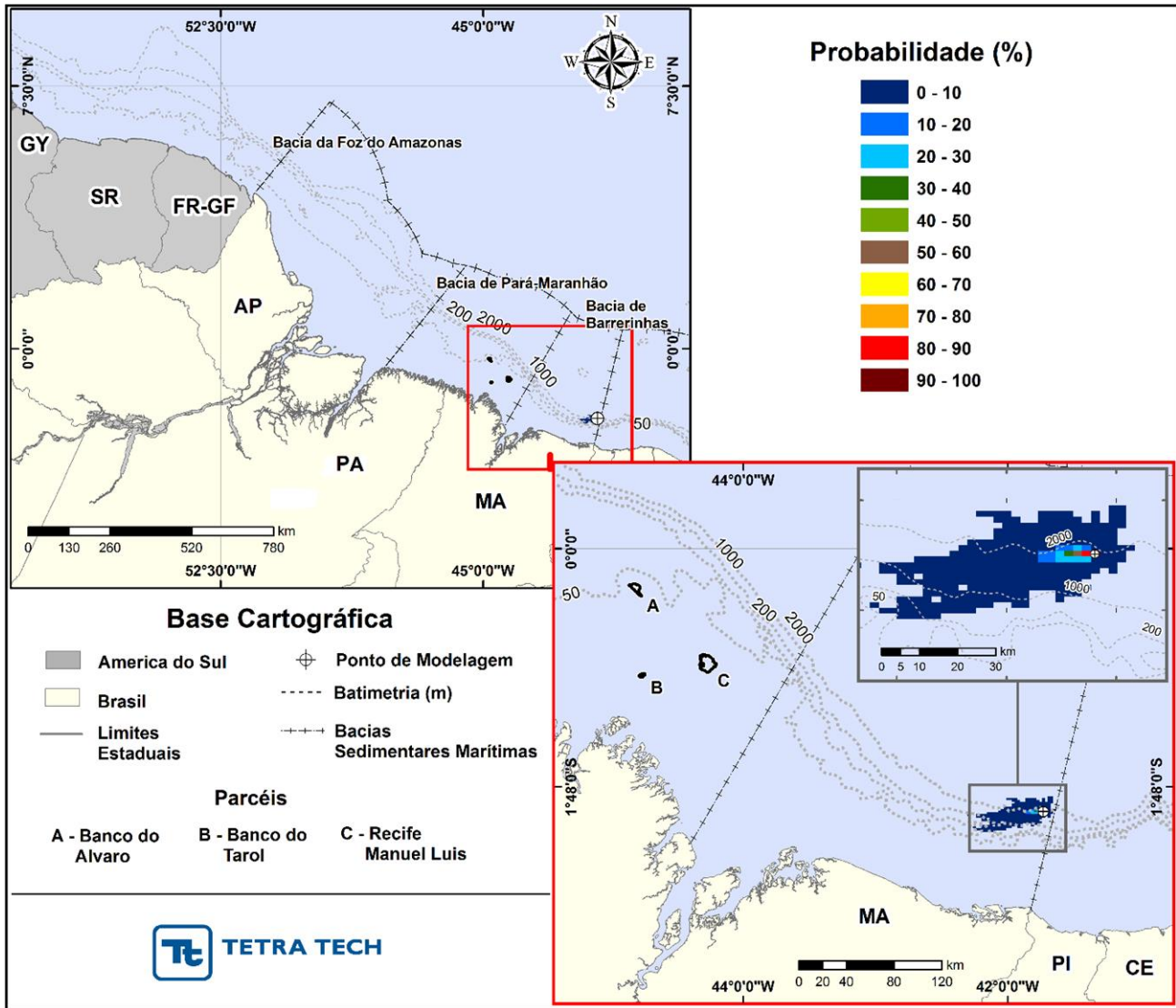


Figura 6 - Cenário BAR_M_346_8_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

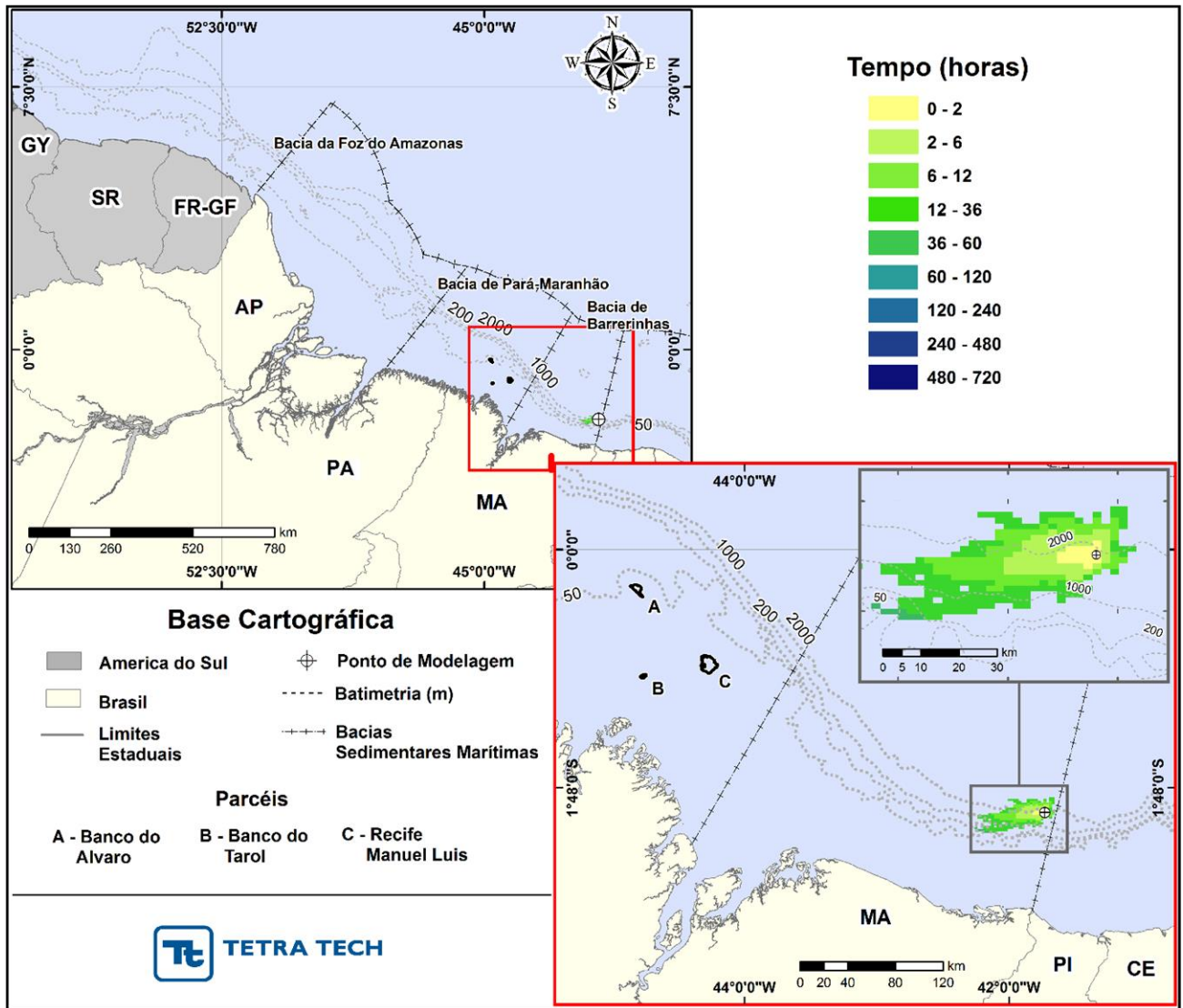


Figura 7 - Cenário BAR_M_346_8_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 8 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

3.1.2. Volume Médio – 200 m³

A seguir, são apresentados os resultados individuais referentes às simulações com vazamento de volume médio, cujo vazamento foi considerado a partir da superfície.

Considerando o critério de corte adotado (0,0003 mm) em atendimento ao Termo de Referência 30/14, não existe probabilidade de toque na costa nos cenários em ambos os períodos simulados. Como pode ser observado, o óleo vazado nestes cenários também apresenta tendência a ficar contido nas camadas superficiais, sendo observado na primeira faixa de profundidade modelada logo abaixo da superfície (camada 1: 0 a 2 m). Considerando o critério de corte de 51 ppb adotado para a coluna d'água, os cenários de volume médio apresentaram óleo somente na primeira camada abaixo da superfície.

Em ambos os períodos, as menores distâncias de uma mancha à costa foram obtidas em relação ao município de Água Doce do Maranhão (MA), sendo de 23,3 km no período de verão e de 55,6 km no período de inverno.

As figuras a seguir, apresentam os resultados das simulações probabilísticas.

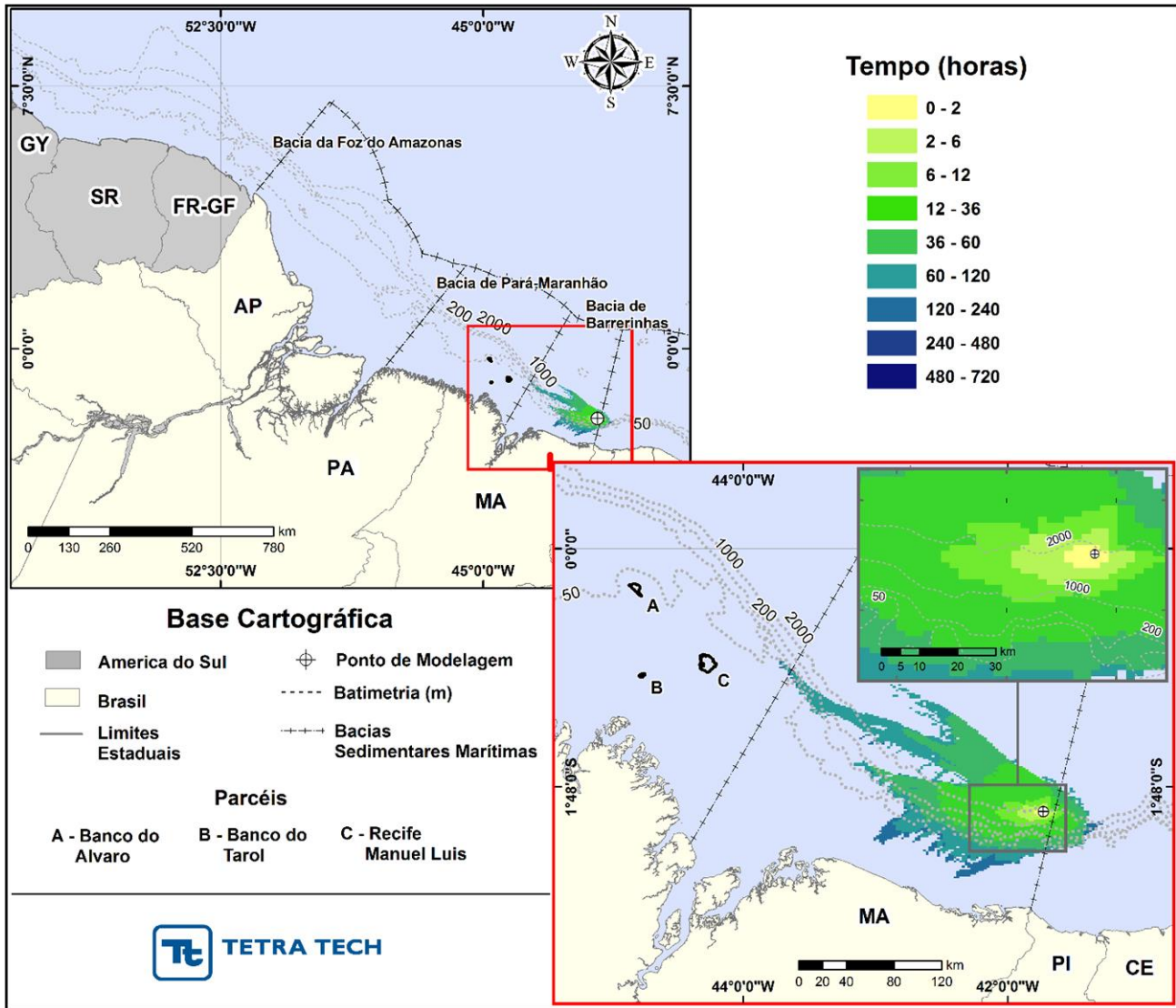


Figura 9 - Cenário BAR_M_346_200_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

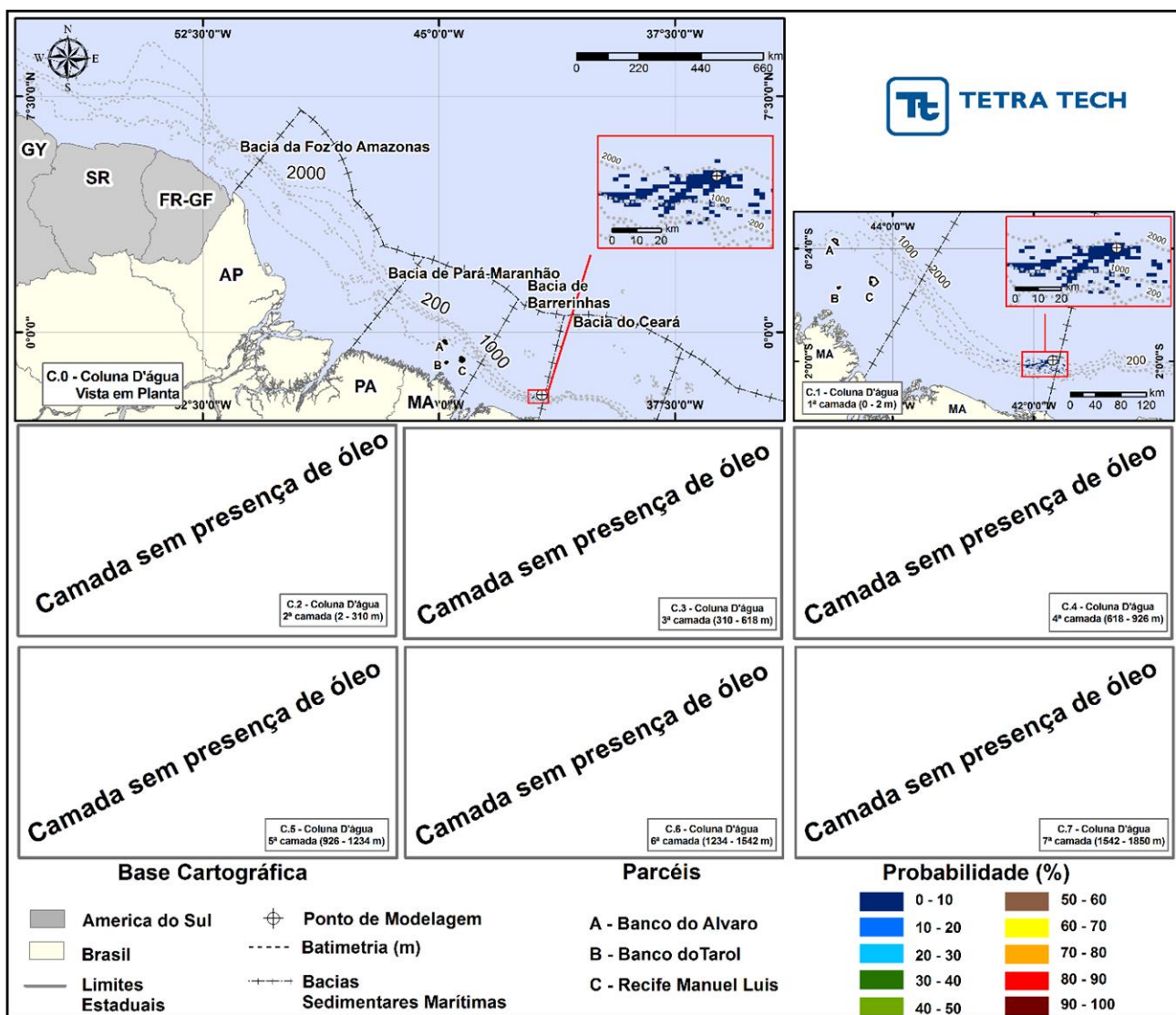


Figura 10 - Cenário BAR_M_346_200_VER: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta¹⁰ e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

¹⁰ Composição das maiores probabilidades ocorrendo em cada ponto da grade independente da profundidade.

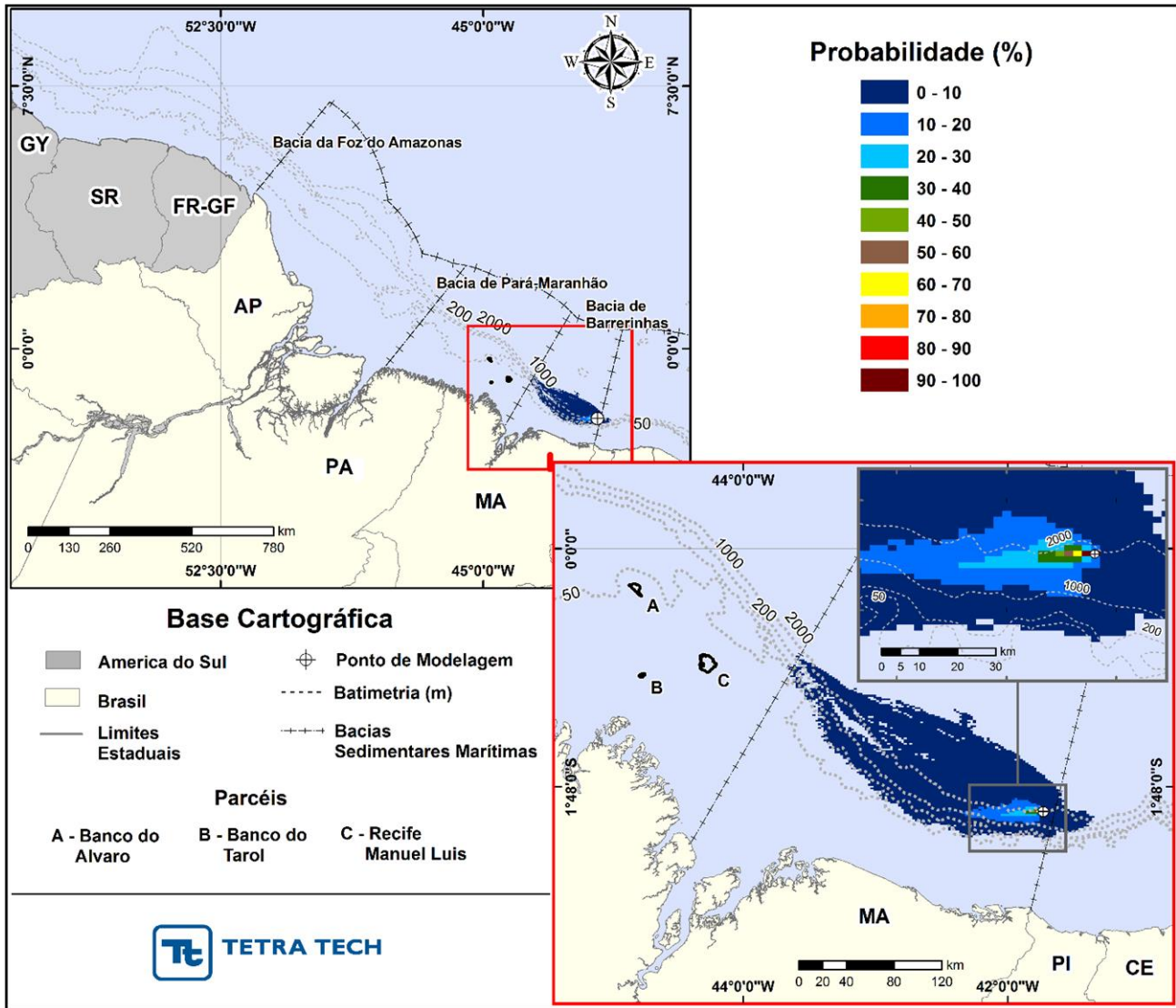


Figura 11 - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

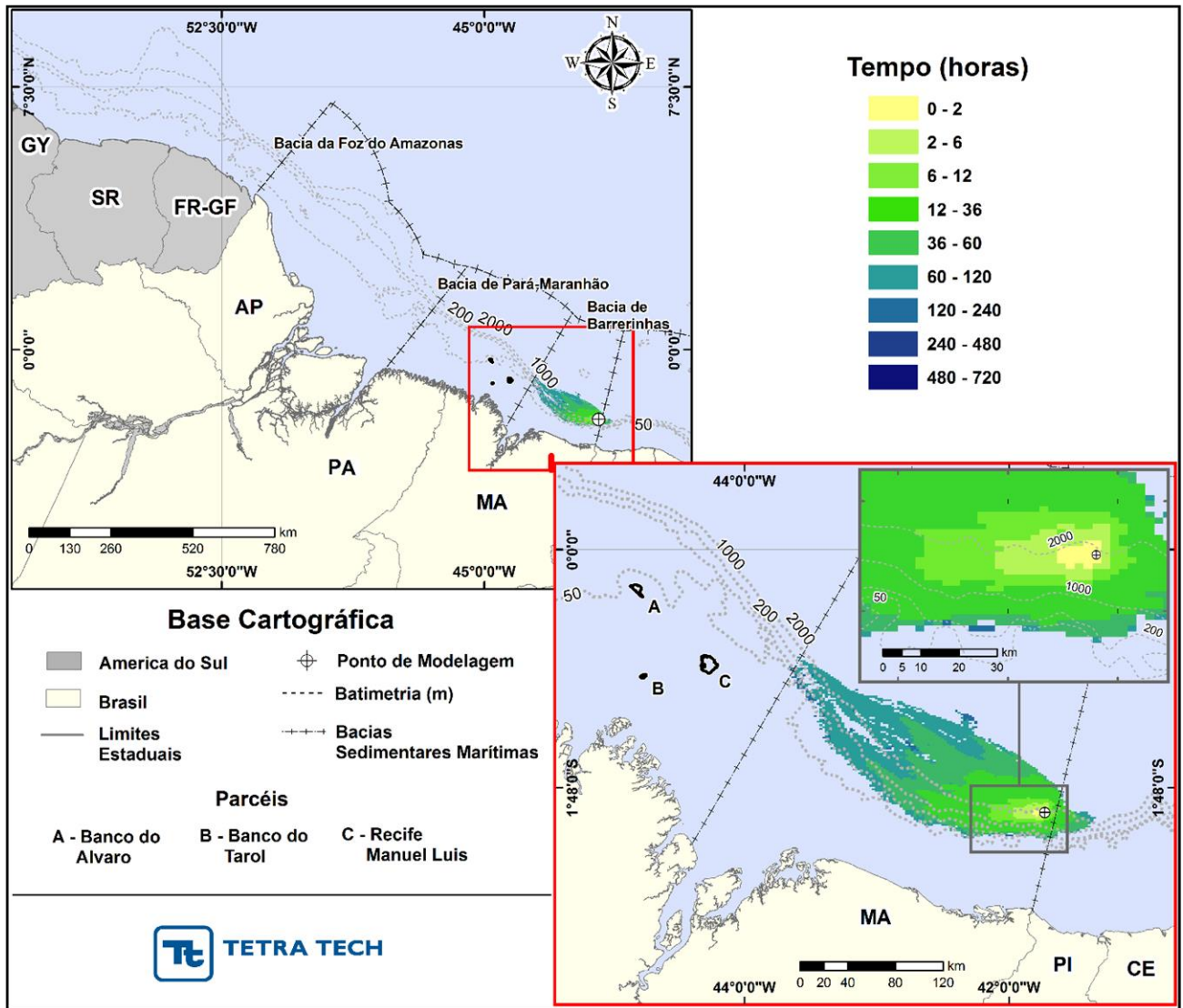


Figura 12 - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

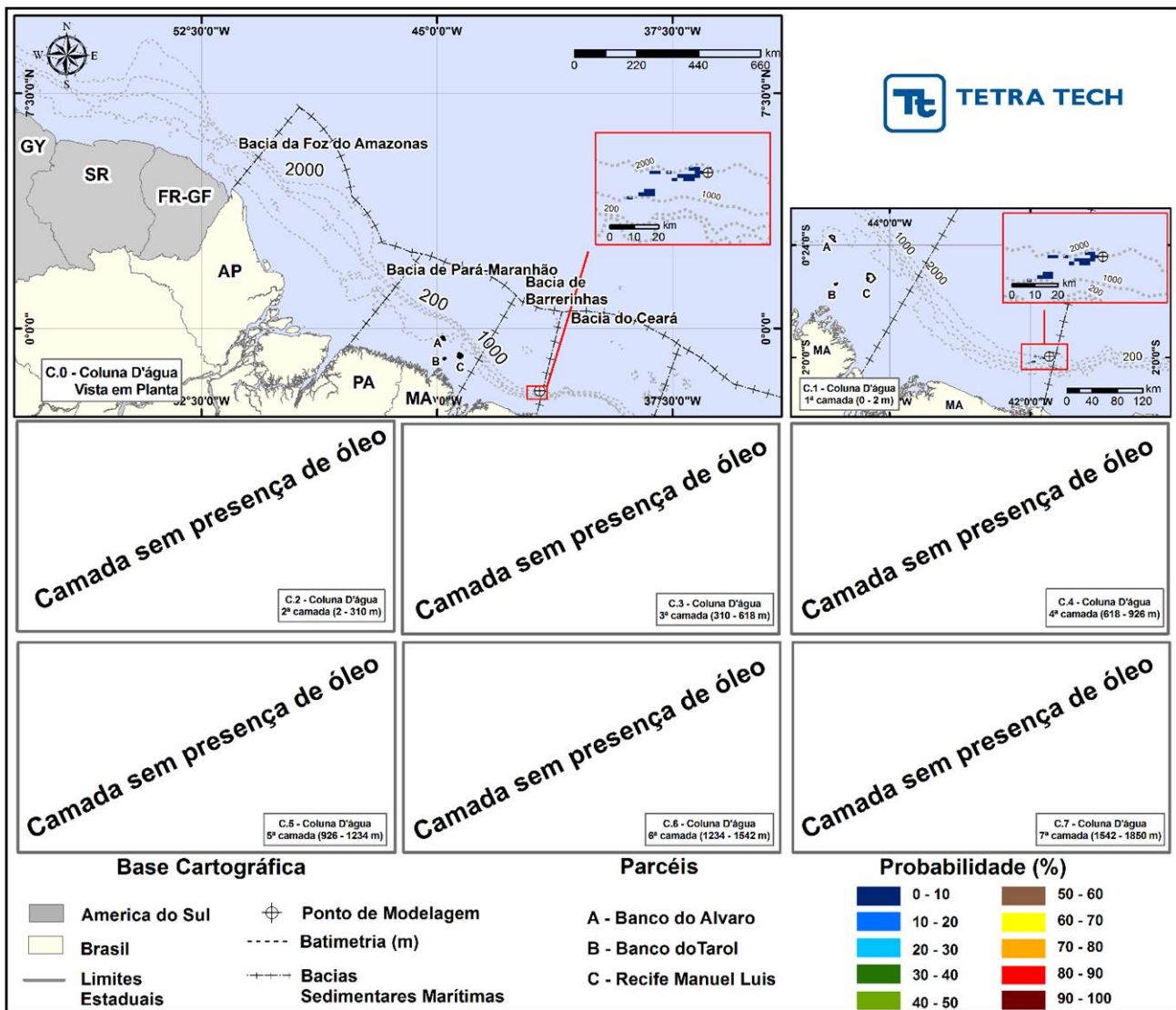


Figura 13 - Cenário BAR_M_346_200_INV: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta¹¹ e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 200 m³ (Instantâneo), após 30 dias de simulação.

¹¹ Composição das maiores probabilidades ocorrendo em cada ponto da grade independente da profundidade.



3.1.3. Volume de Pior Caso – 50.720,1m³

A seguir, são apresentados os resultados referentes às simulações com vazamento de volume de pior caso, cujo vazamento ocorreu a partir do fundo do mar. Mesmo considerando o critério de corte adotado (0,0003 mm) em atendimento ao Termo de Referência 30/14, observou-se probabilidades de toque na costa em ambos os períodos simulados. Observa-se também que existe óleo presente tanto na superfície quanto na coluna d'água.

Observa-se que a maior extensão de costa com probabilidade de chegada de óleo ocorreu durante o período de inverno (1.120,86 km), enquanto que no período de verão a extensão de costa atingida pelo óleo foi de 860,24 km.

A análise das probabilidades de óleo ao longo da coluna, considerando o corte adotado (51 ppb), comprova a presença do mesmo também nas camadas mais profundas. Ainda que o derrame ocorra a partir do fundo, os resultados indicaram que, a primeira camada da coluna d'água, logo abaixo da superfície (camada 1; 0 – 2 m), apresenta uma área significativamente superior as demais, uma vez que esta camada é de transição entre a superfície e a coluna d'água, ou seja, recebe óleo tanto das camadas inferiores através do afloramento quanto da superfície pelo processo de entranhamento.

Também se observou na camada 1 que, nas regiões próximas ao ponto de modelagem, não ocorreram probabilidades de presença de óleo com valores acima do corte adotado.

Conforme já apresentado, o tempo mínimo de afloramento do óleo foi de 6 horas, entretanto, isto não significa que todo o óleo aflora em 6 horas já que as parcelas do óleo apresentam diferentes tempos de afloramento. Assim, quanto maior o tempo de afloramento, e em virtude da distribuição mais frequente das correntes ao longo da coluna d'água, mais distante do ponto de modelagem o óleo poderá aflorar devido aos efeitos do transporte ocasionado por este padrão de correntes. Desta forma, algumas regiões superficiais mais distantes podem receber uma parcela do óleo oriunda do processo de afloramento e não apenas da advecção da mancha aflorada, aumentando as possibilidades de ocorrer um incremento na massa de óleo nas células destas regiões. No entanto, isto é esperado de ser mais destacado em um campo próximo à fonte de vazamento, não sendo representativo à medida que a mancha deriva para longe da região do bloco.

Associado a este processo, deve-se considerar que, para o óleo que já aflorou, quanto mais tempo na água, maior será o deslocamento, expondo-o a mais processos (e mais intensos) de intemperismo. No modelo OSCAR, o processo de intemperismo altera, dentre outras variáveis, a viscosidade do óleo, que aumenta quanto mais “intemperizado” estiver o mesmo. E quanto maior a viscosidade, maior o potencial de entranhamento do óleo que, conseqüentemente, aumenta as chances de interação (mais massa) com a coluna d’água, principalmente na camada 1.

Considerando a atuação destes processos e da dinâmica das correntes na coluna d’água, além do corte de concentrações adotado, observa-se que não existe probabilidade de presença de óleo em algumas camadas da coluna d’água.

Ressalta-se que a atuação destes processos é complexa, podendo ocorrer simultaneamente ou mesmo sem que seja possível identificar com precisão o instante ou região na qual um ou os dois processos são responsáveis pelos resultados observados.

As figuras a seguir, apresentam os resultados das simulações probabilísticas.

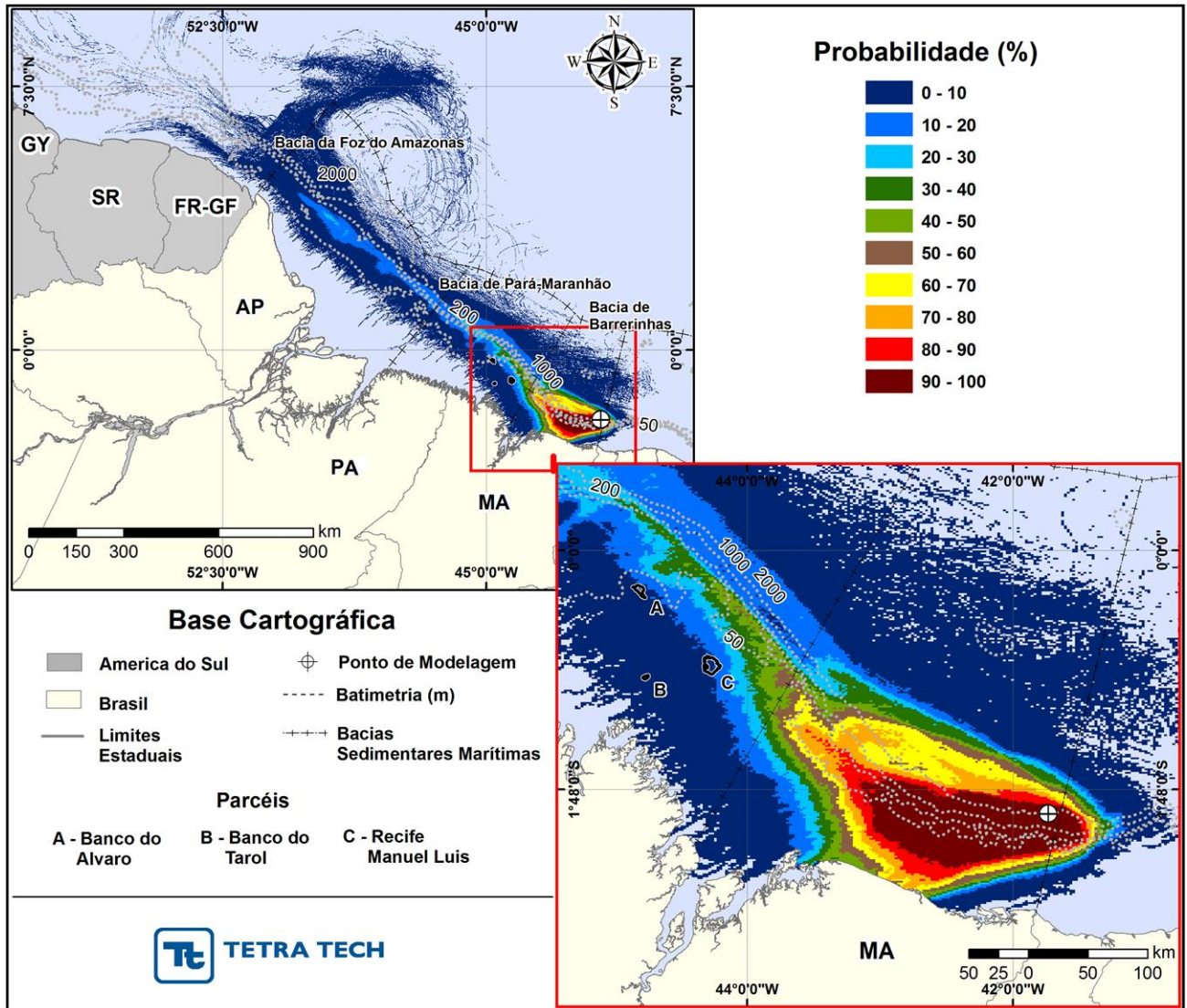


Figura 14 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

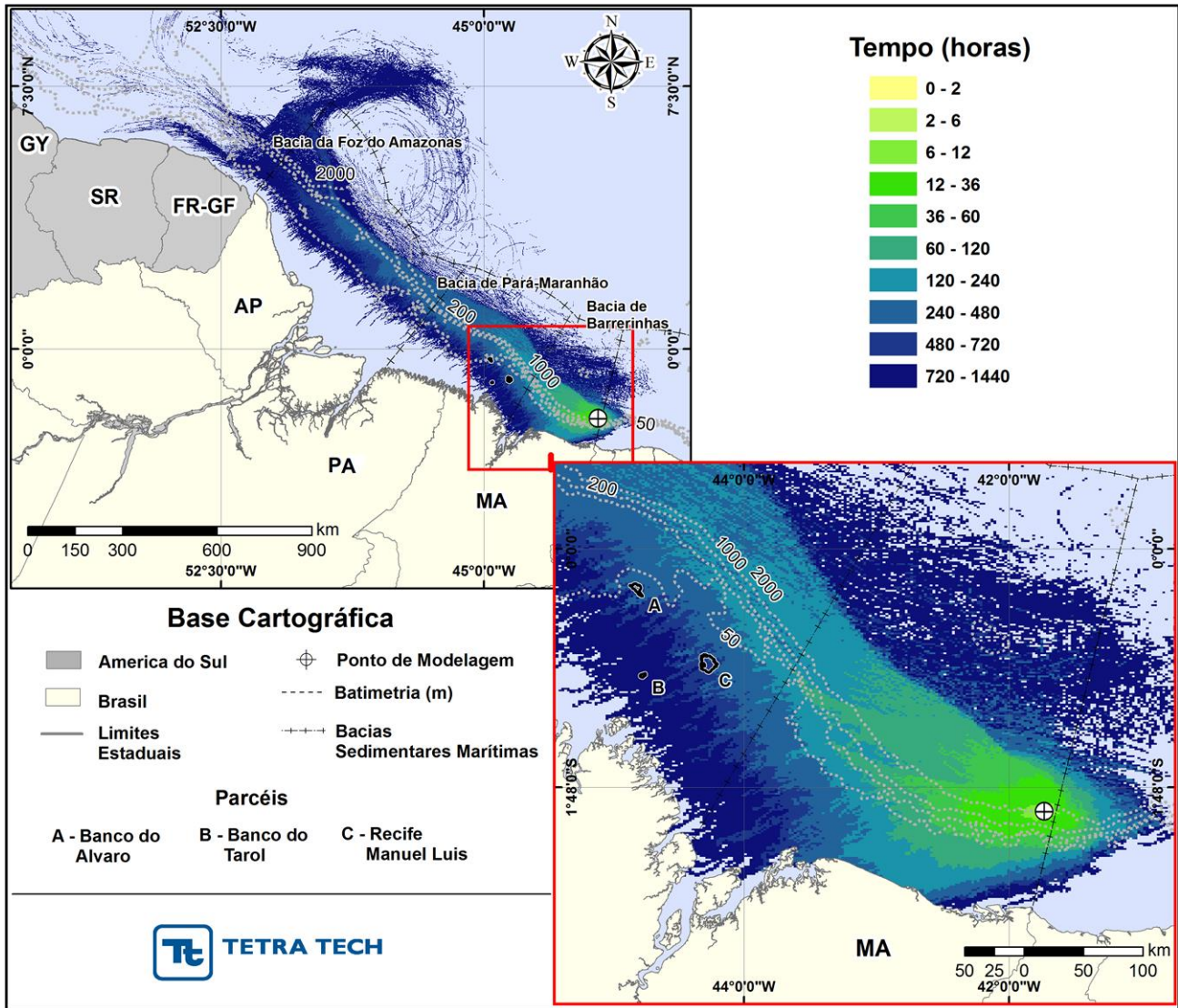


Figura 15 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

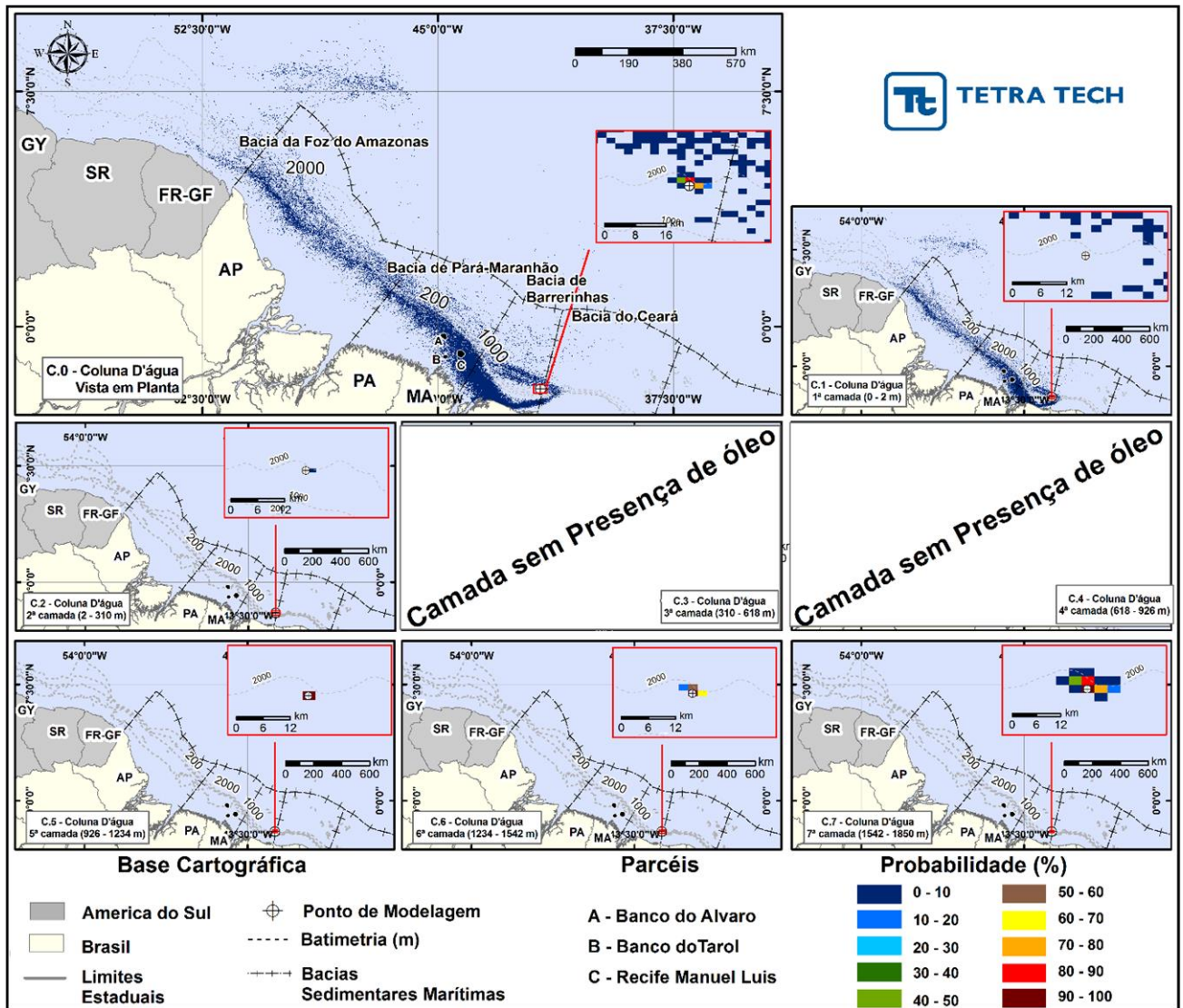


Figura 16 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta¹² e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

A ausência de camadas com informação do óleo, observada na Figura 16, está associada a um maior espalhamento em função da dinâmica das correntes que, por consequência, reduz as concentrações a valores abaixo do corte.

¹² Composição das maiores probabilidades ocorrendo em cada ponto da grade independente da profundidade.

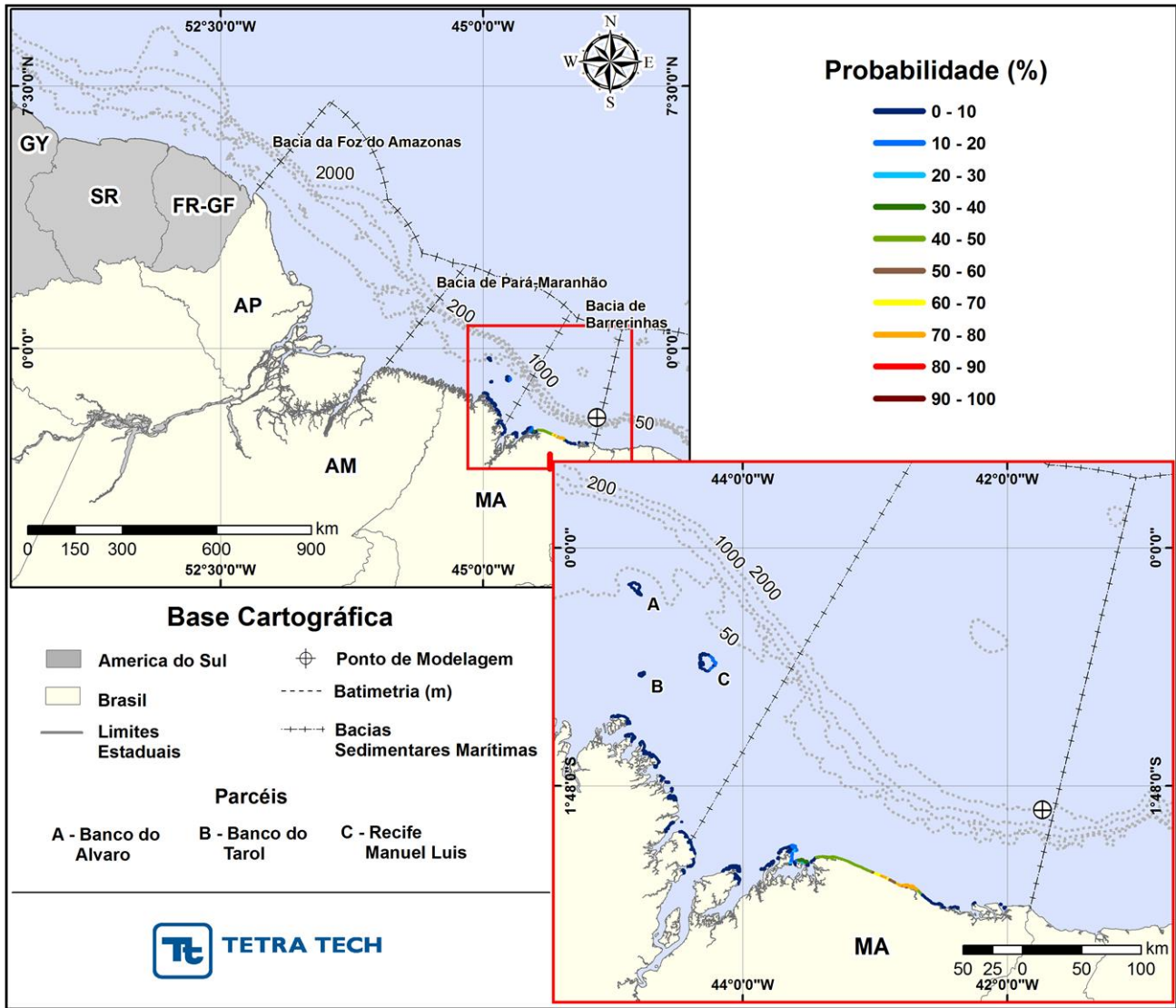


Figura 17 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

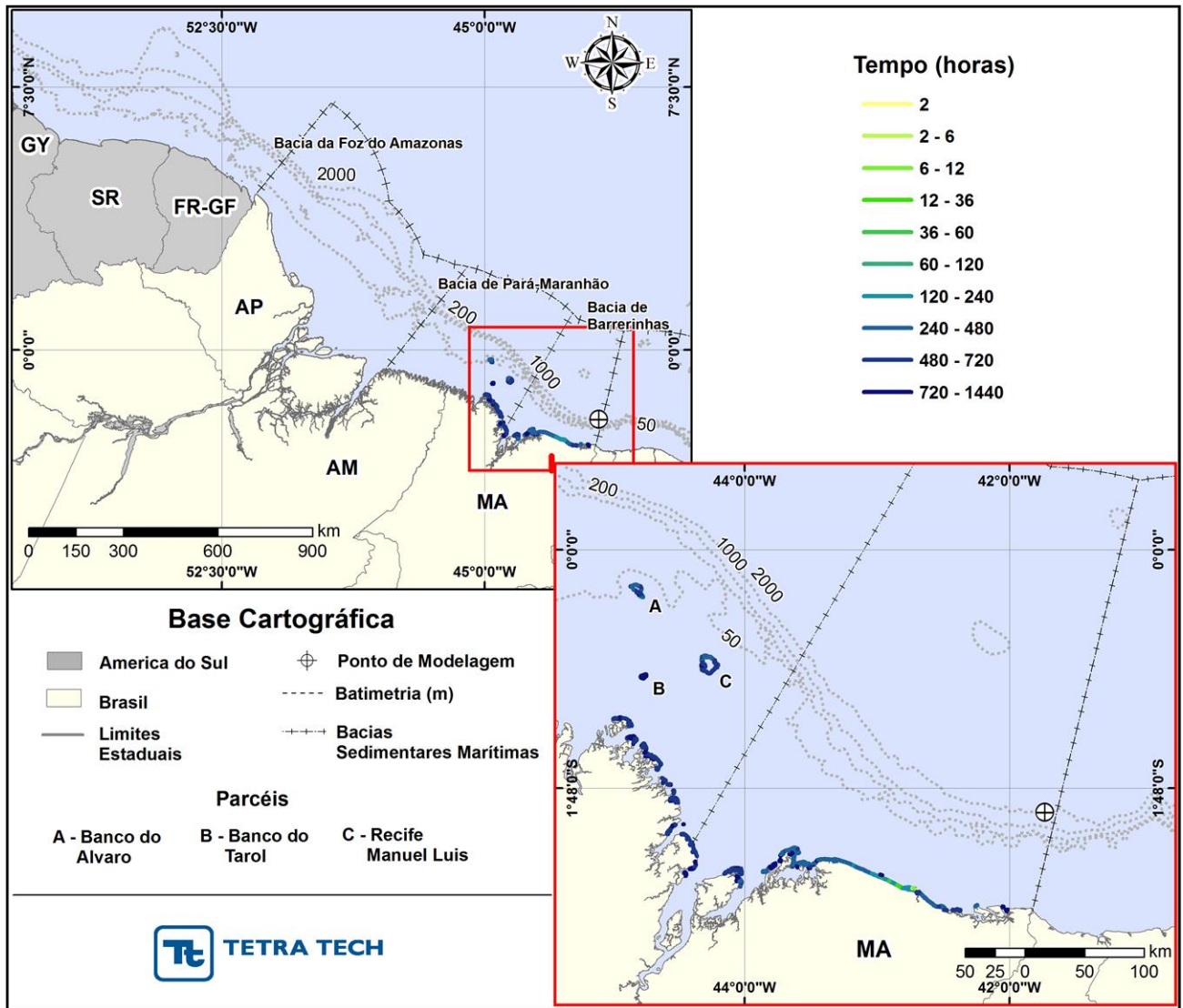


Figura 18 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Tempo mínimo de toque do óleo na costa (horas) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

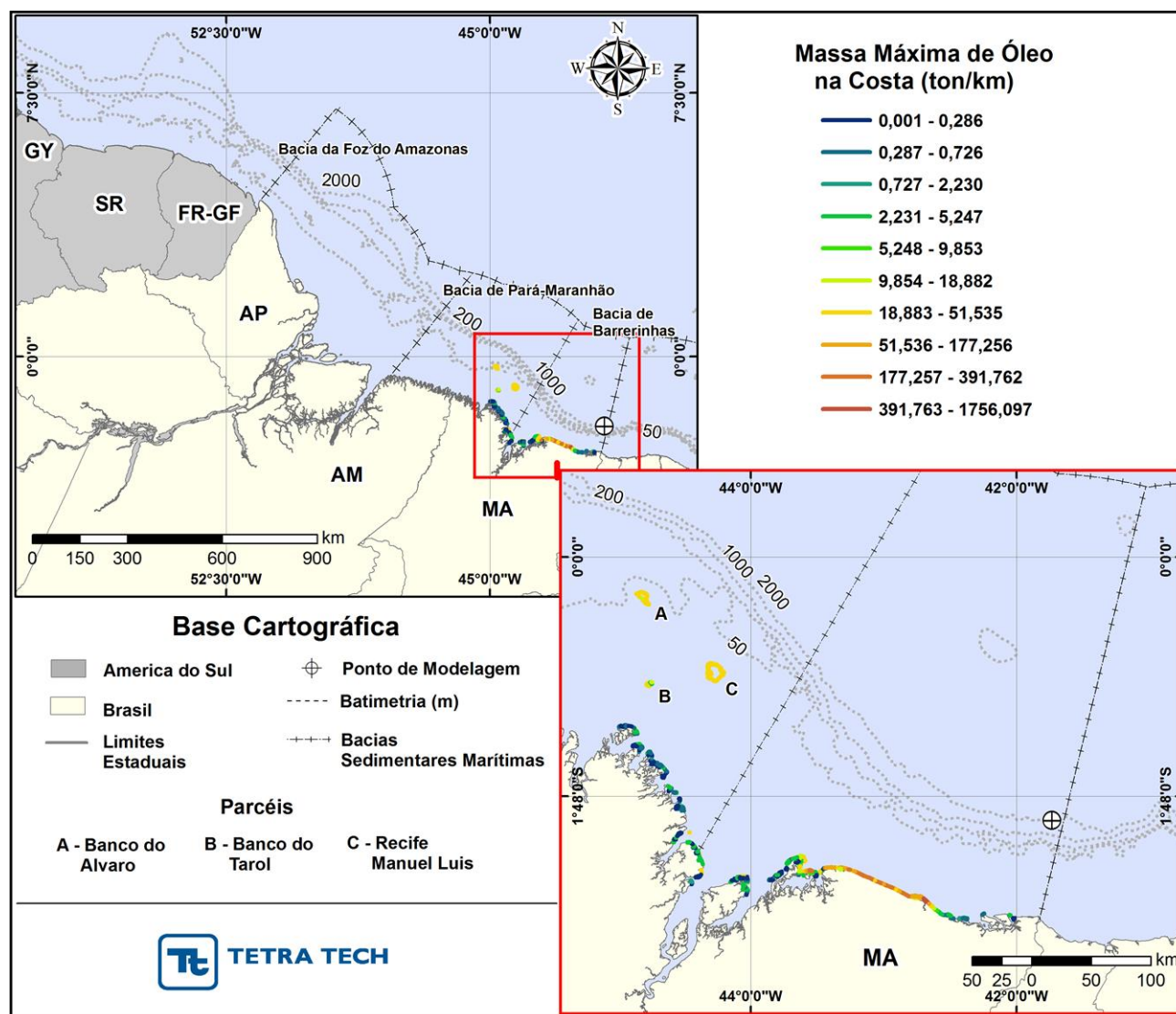


Figura 19 - Cenário BAR_M_346_PC_VER: Massa máxima de óleo na costa (ton./km) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

A seguir, é apresentada a tabela de municípios com as informações de tempo mínimo de toque, probabilidade e massa de óleo na costa, além da extensão de toque por município para o período de verão.

Observa-se que o menor tempo de toque na costa para o período de verão foi de 171 horas no município de Santo Amaro do Maranhão – MA. A maior probabilidade de óleo na costa ocorreu no município de Barreirinhas – MA (80%), apresentando também a maior massa de óleo na costa (1.756,09 ton/km).



Tabela 8 - Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para os municípios com probabilidade de toque, período de verão, com derrame de volume de 50.720,1 m³, para o Bloco BAR-M-346.

UF	MUNICIPIO	PROBABILIDADE DE ÓLEO NA COSTA (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)	MASSA MÁXIMA NA COSTA (ton/km)	EXTENSÃO DE TOQUE (km)
MA	Apicum-Açú	10,0	561	3,2514	45,74
	Cururupú	9,8	485	2,6955	94,11
	Porto Rico do Maranhão	9,3	608	0,5396	19,20
	Cedral	9,0	558	0,5402	27,23
	Guimarães	10,0	518	2,9417	27,60
	Baia do Cumã	10	518	2,8862	19,22
	Alcântara	10,0	527	3,2421	66,77
	Baia de São Marcos	10,0	691	2,9890	21,16
	Raposa	10,0	507	3,1682	101,61
	Paço do Lumiar	9,5	760	3,0011	1,60
	São José de Ribamar	9,5	441	4,8894	41,32
	Baia do Arraial	9,5	441	19,3990	41,32
	Icatú	9,8	341	0,5804	36,48
	Humberto de Campos	39,5	252	313,6601	193,21
	Primeira Cruz	49,8	274	391,7620	30,68
	Santo Amaro do Maranhão	67,7	171	376,0320	46,01
	Barreirinhas	80,0	182	1756,0970	75,22
	Paulino Neves	10,0	248	27,4052	29,75
	Tutóia	9,5	459	1,1602	15,57
Araioses	1,0	1017	0,3809	8,13	

OBS1: as análises apresentadas nesta tabela são referentes aos resultados fornecidos pelo modelo OSCAR para a linha de costa, ou seja, não são considerados os resultados de óleo presentes na coluna d'água.

OBS2: para o caso de massa de óleo na costa, uma vez que o modelo OSCAR disponibiliza apenas informações de massa por célula, para a obtenção dos valores de massa por km, foi realizado o cálculo considerando o valor de massa por célula da grade habitat (2,3 x 1,5 km) dividido pela distância diagonal da célula (2,7 km).

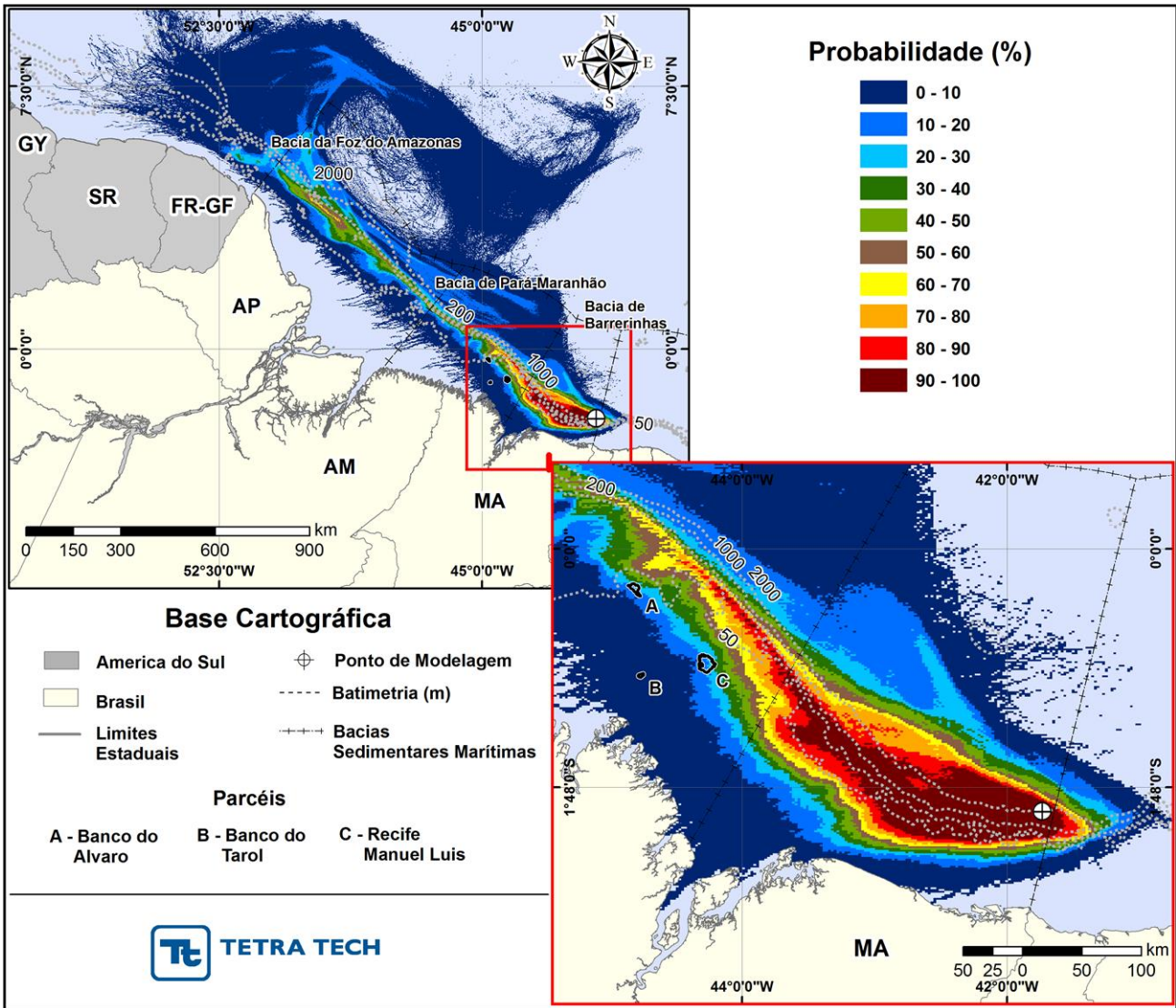


Figura 20 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos de probabilidade de óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

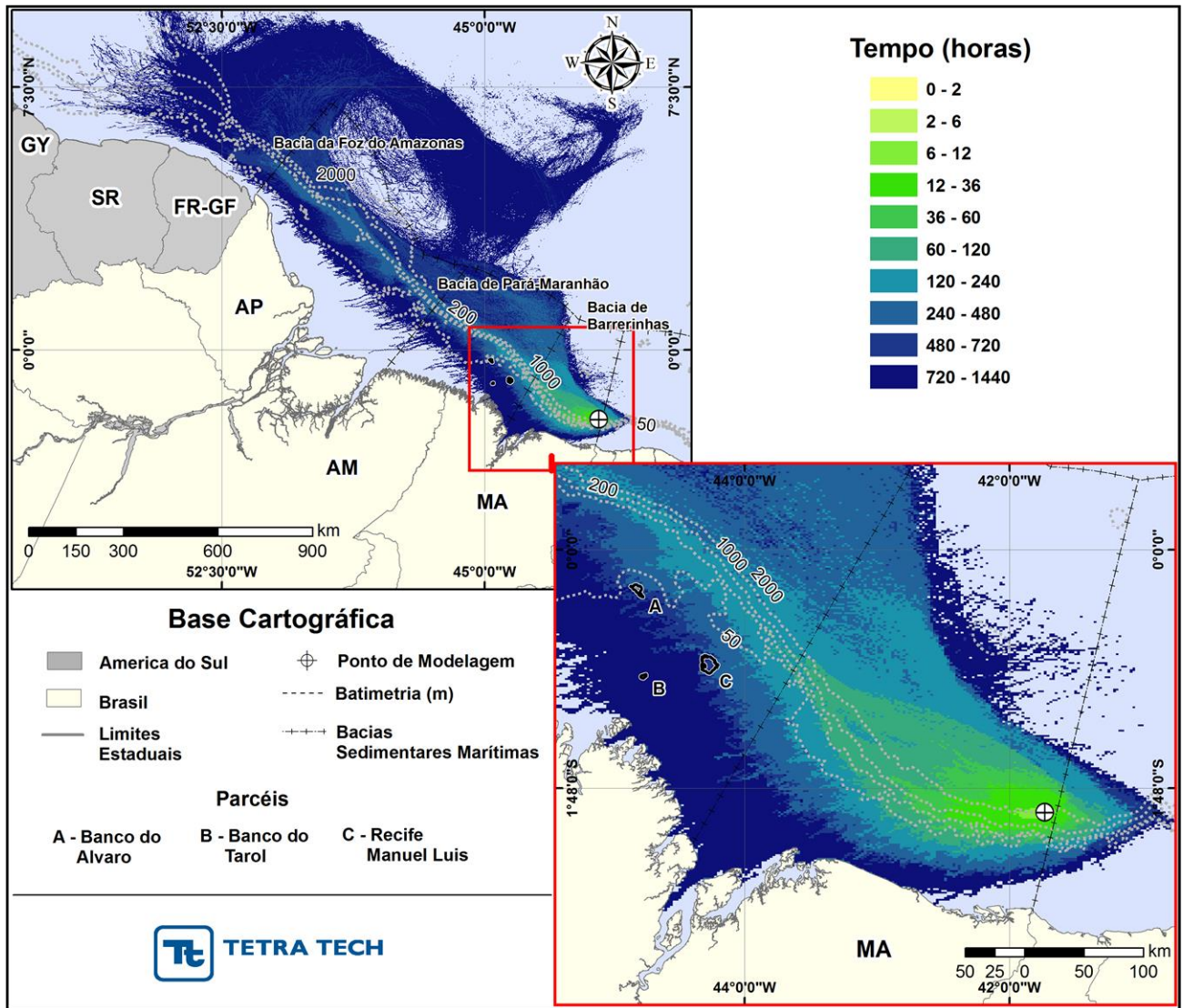


Figura 21 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

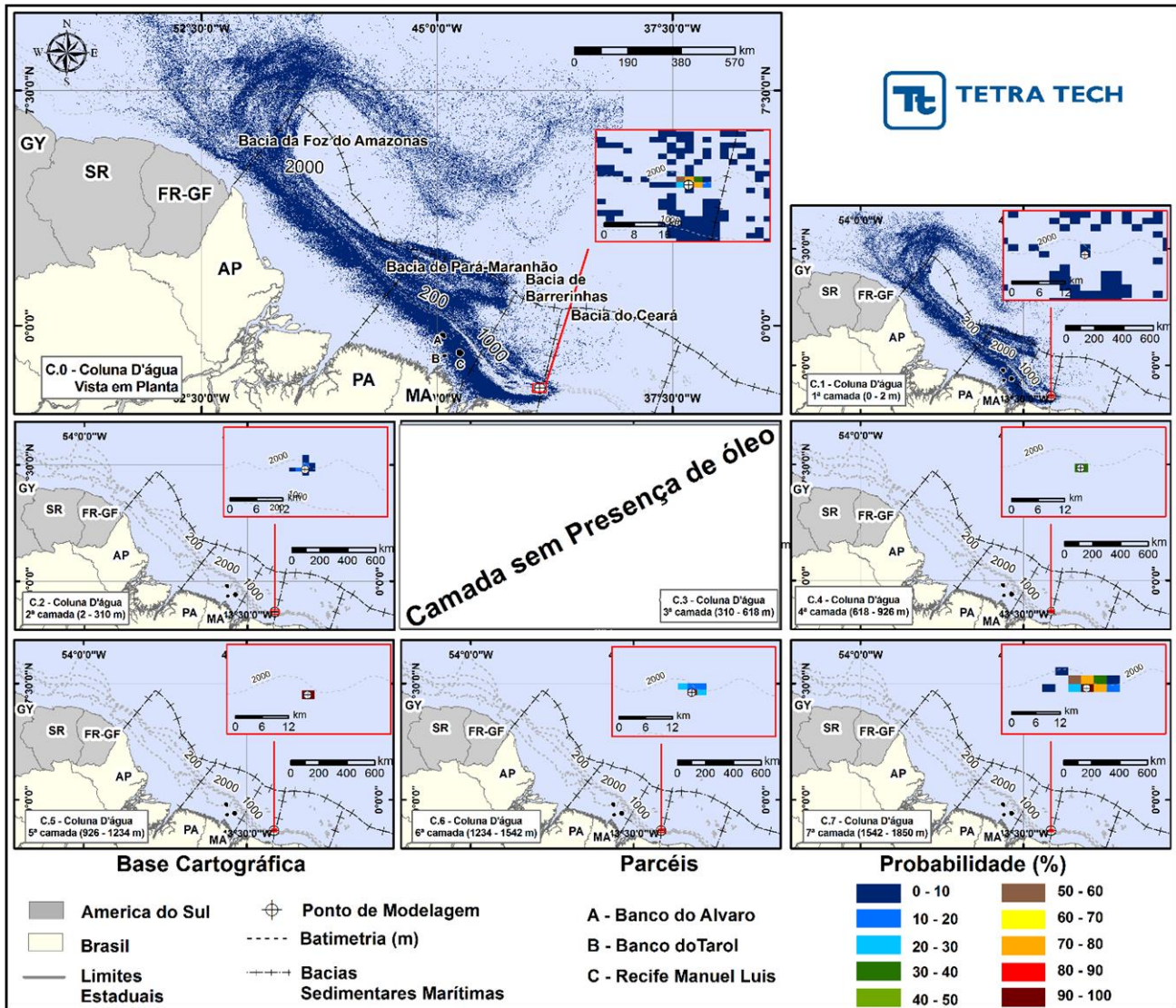


Figura 22 – Cenário BAR_M_346_PC_INV: Contornos de probabilidade de óleo na coluna d'água (vista em planta¹³ e por camada vertical) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

Conforme já apresentado, Na Figura 22, a diferença no padrão das correntes ao longo da profundidade explica a possibilidade de camadas com valores sem concentrações abaixo do valor de corte.

¹³ Composição das maiores probabilidades ocorrendo em cada ponto da grade independente da profundidade.

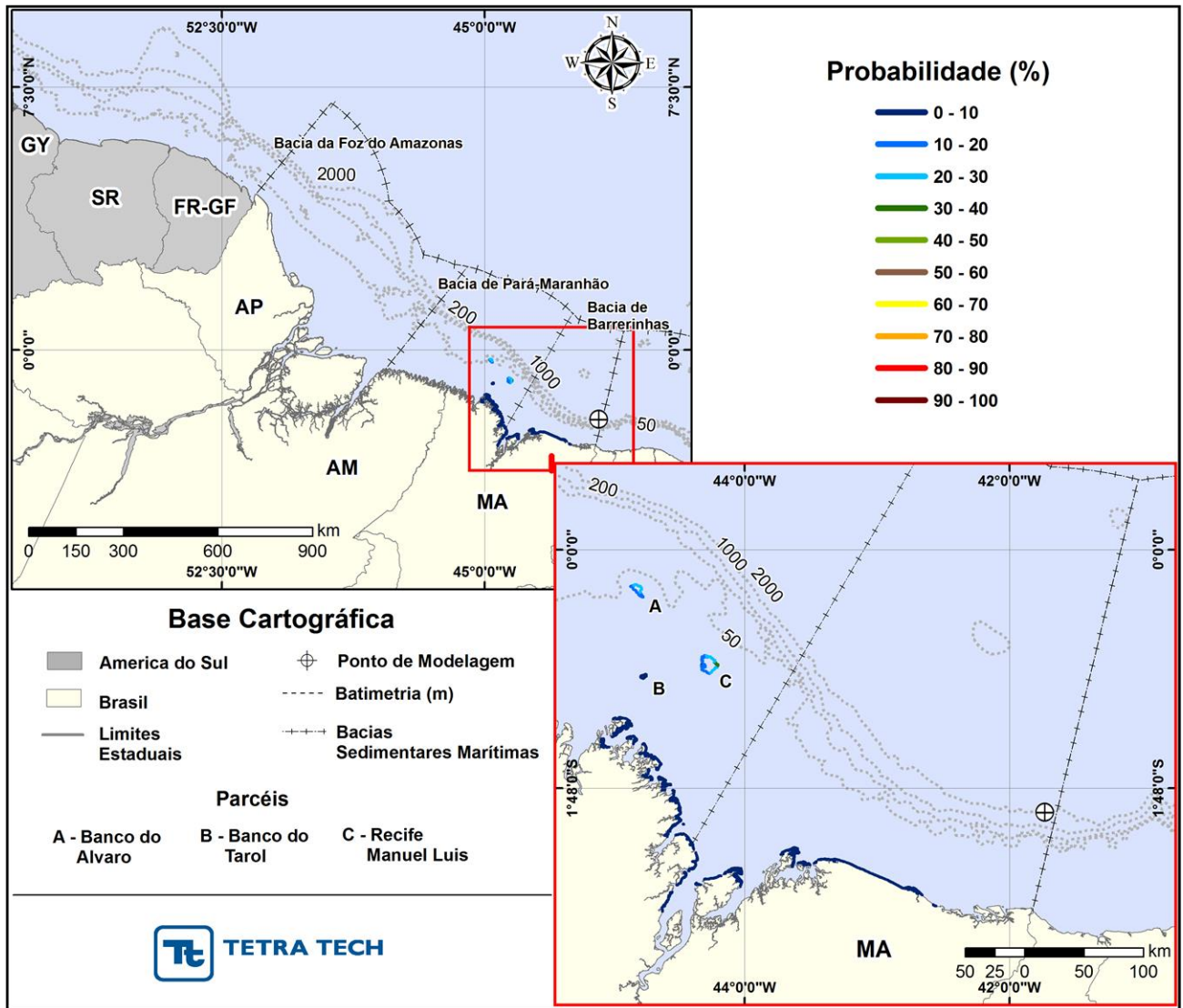


Figura 23 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Intervalos de probabilidade de toque de óleo na costa para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

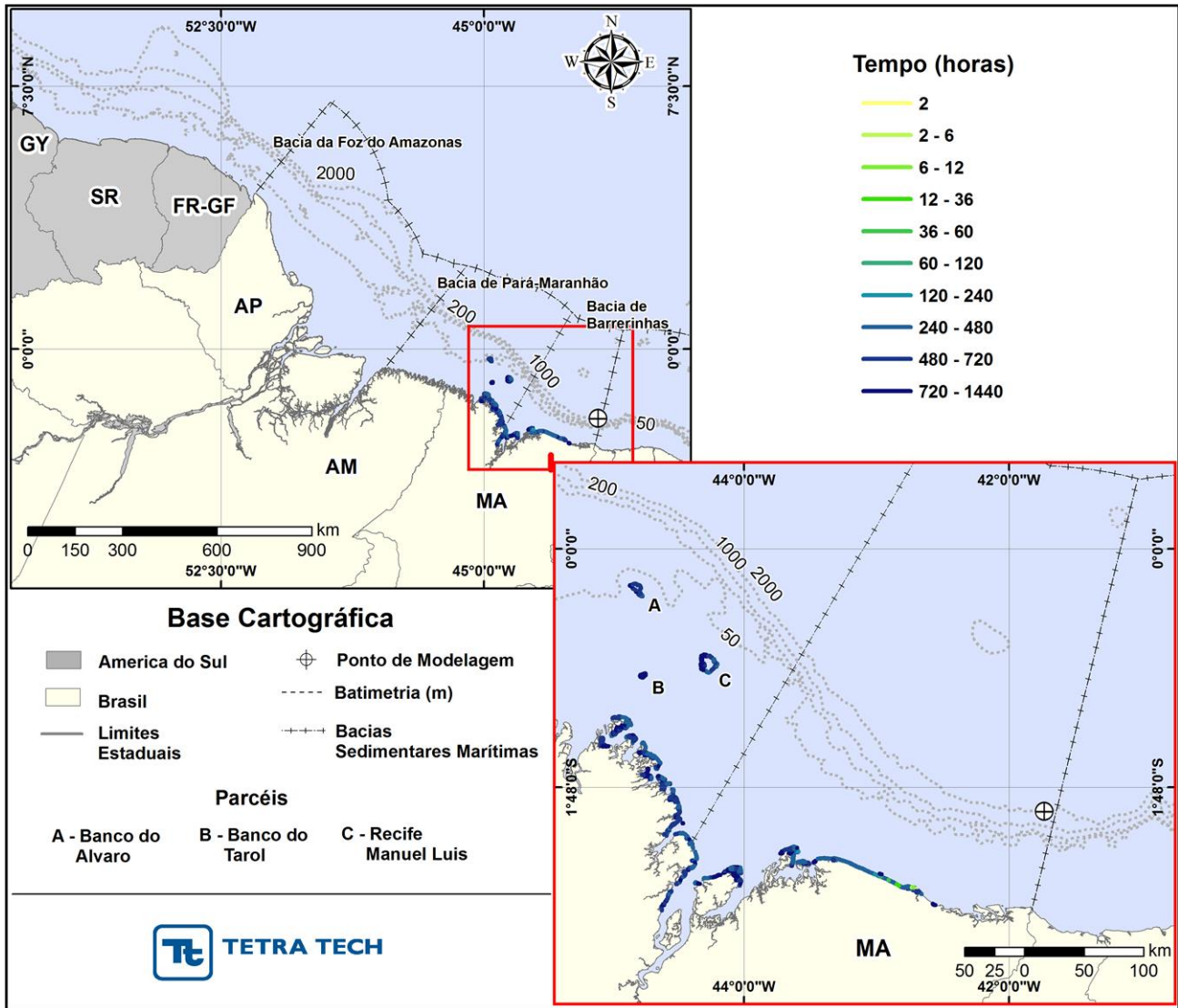


Figura 24 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Tempo mínimo de toque de óleo na costa (horas) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

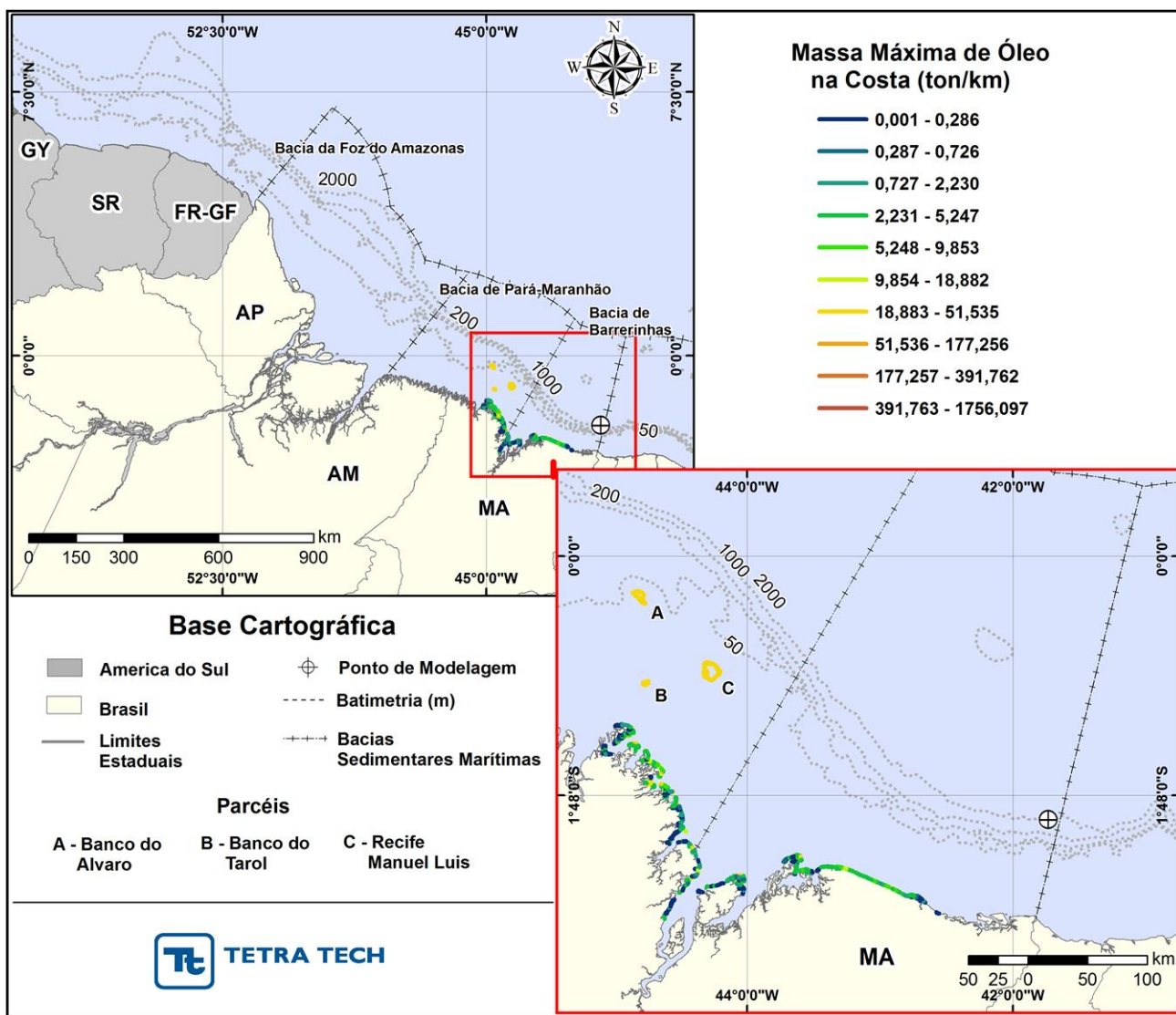


Figura 25 - Cenário BAR_M_346_PC_INV: Massa máxima de óleo na costa (ton./km) para um acidente no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com derrame de 50.720,1 m³ (durante 30 dias), após 60 dias de simulação.

A seguir, é apresentada a tabela de municípios com as estatísticas de tempo mínimo de toque, probabilidade e massa de óleo na costa, além da extensão de toque por município para o período de inverno.

Observa-se que o menor tempo de toque na costa para o período de inverno foi de 239 horas no município de Humberto de Campos – MA. A maior probabilidade de óleo na costa ocorreu nos municípios São Luís e Santo Amaro do Maranhão, e na Baía de São Marcos – MA (10%). A maior massa de óleo na costa ocorreu no Município de Barreirinhas (23,82 ton/km).

Tabela 9 - Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para os municípios com probabilidade de toque, período de inverno, com derrame de volume de 50.720,1 m³, para o Bloco BAR-M-346.

UF	MUNICIPIO	PROBABILIDADE DE ÓLEO NA COSTA (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)	MASSA MÁXIMA NA COSTA (ton/km)	EXTENSÃO DE TOQUE (km)
MA	Apicum-Açú	9,3	396	5,8475	212,15
	Cururupú	9,8	401	12,5129	136,96
	Porto Rico do Maranhão	9,5	435	4,3581	43,99
	Cedral	9,7	379	2,8168	53,53
	Guimarães	9,7	471	3,3073	54,03
	Baia do Cumã	9,7	471	1,6735	29,886
	Alcântara	9,8	320	4,3201	89,41
	Bacurituba	9,5	467	3,3280	30,98
	Baia de São Marcos	10,0	377	3,3280	90,27
	São Luís	10,0	382	3,8557	16,92
	Raposa	9,8	371	3,7412	122,56
	Paço do Lumiar	8,5	850	3,0053	16,27
	São José de Ribamar	8,5	624	3,0053	40,55
	Baia do Arraial	8,5	624	4,2341	31,51
	Humberto de Campos	9,7	239	7,4782	154,88
	Primeira Cruz	9,3	323	3,7845	22,75
	Santo Amaro do Maranhão	10,0	251	14,3472	46,01
	Barreirinhas	9,8	333	23,8252	76,89
Paulino Neves	9,0	908	0,1613	2,98	

OBS1: as análises apresentadas nesta tabela são referentes aos resultados fornecidos pelo modelo OSCAR para a linha de costa, ou seja, não são considerados os resultados de óleo presentes na coluna d'água.

OBS2: para o caso de massa de óleo na costa, uma vez que o modelo OSCAR disponibiliza apenas informações de massa por célula, para a obtenção dos valores de massa por km, foi realizado o cálculo considerando o valor de massa por célula da grade habitat (2,3 x 1,5 km) dividido pela distância diagonal da célula (2,7 km).



3.2. SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas realizadas permitiu identificar, dentre as 600 simulações realizadas, os cenários determinísticos críticos para as condições de menor tempo de toque do óleo na costa e para a maior massa de óleo na costa, para os dois períodos simulados. Para os cenários que não apresentaram probabilidade de toque, foram considerados os cenários determinísticos de menor distância do óleo em relação a um ponto de costa.

Estas simulações foram reproduzidas individualmente no modo determinístico do OSCAR, levando-se em consideração os critérios de corte para espessura e concentração do óleo, na superfície e na coluna, respectivamente.

Também, conforme explicado na introdução deste capítulo, uma vez que no OSCAR os cálculos para o óleo na superfície, coluna d'água e costa são realizados de forma segregada, foi necessário um balizamento da extensão de toque do óleo na costa com a área superficial. O toque na costa somente foi apresentado quando observada a presença de óleo na superfície, acima do corte, na célula adjacente à célula de costa. Porém, não é possível realizar este balizamento para os resultados do balanço de massa.

Os resultados das simulações determinísticas são apresentados na forma de quatro ilustrações. A primeira apresenta a área varrida pela mancha do óleo na superfície (representada pela cor cinza) para todo o período de simulação. São apresentados, também, os contornos de espessura do óleo no instante de primeiro toque na costa (maior proximidade em relação à costa).

A segunda ilustração apresenta os contornos de espessura máxima do óleo na superfície da água, calculados ao longo de todo o período da simulação.

A terceira figura apresenta os resultados da concentração máxima do óleo na coluna d'água. Nesta figura a concentração é apresentada em planta, ou seja, são os maiores valores de concentração identificados para cada célula independente da camada. Também são apresentados os valores máximos de concentração para cada camada.

A quarta ilustração apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado, na coluna d'água e biodegradado) para as simulações determinísticas. Ressalta-se que, quando o volume final de óleo na costa é muito pequeno, não é possível visualizar a sua porcentagem nos balanços de massa.

Adicionalmente, são apresentadas figuras com as condições meteorológicas e oceanográficas atuantes nos cenários determinísticos críticos de cada sazonalidade.

Pode se observar que os cenários que apresentaram toque na costa foram apenas os de Pior Caso, para ambos os períodos simulados. Os cenários de 8 m³ e 200 m³ não apresentaram toque de óleo na costa, portanto, são apresentados separadamente no subitem 3.2.3 (cenários determinísticos de menor distância).

No Anexo E apresentam-se as análises de frequência de vento e corrente para os períodos dos cenários determinísticos simulados.

3.2.1. Cenários Determinísticos Críticos – Menor Tempo

A Tabela 10 apresenta um resumo dos cenários determinísticos críticos de menor tempo do toque do óleo na costa, referentes ao volume de pior caso. Verifica-se que os menores tempos de toque foram de 171 horas para o cenário de verão, com o primeiro toque ocorrendo no Município de Santo Amaro do Maranhão (MA), e 239 horas para o período de inverno, com primeiro toque em Humberto de Campos (MA). O volume de óleo final na costa foi ligeiramente superior no período de verão em comparação ao inverno, com 7 m³ e 5 m³, respectivamente.

Tabela 10 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados ao menor tempo de toque na costa.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	MUNICÍPIO DE PRIMIERO TOQUE	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m ³)
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER	14/01/2014 - 17:00hs	171,0	Santo Amaro do Maranhão (MA)	7,0
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV	26/08/2014 - 19:00hs	239,0	Humberto de Campos (MA)	5,0

OBS: o volume de óleo final à costa é calculado com base na porcentagem do balanço de massa e volume inicial de derrame.

Na Tabela 11 é apresentada a área de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística de menor tempo de toque. Observa-se que, durante o período de inverno, uma maior área superficial com probabilidade de ser atingida por óleo, cobrindo 197.113,0 km². Durante o período de verão a área atingida foi de 37.916,0 km².

Tabela 11 - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.

CENÁRIOS	ÁREA DE DESLOCAMENTO DO ÓLEO AO LONGO DE TODA A SIMULAÇÃO (Km ²)
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER	37.916,0
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV	197.113,0

Da Figura 26 a Figura 33 são apresentados os resultados determinísticos críticos de menor tempo de toque do óleo na costa para os derrames com volume de Pior Caso (50.720,1m³). Analisando os gráficos de balanço de massa destas simulações, observa-se que a biodegradação e interação com a coluna d'água foram os processos intempéricos mais importante na dispersão do óleo ao final do período simulado. Por se tratar de um derrame de fundo em grandes profundidades, o óleo sofre um processo de biodegradação ao longo de toda a coluna da água.

Além disso, processos intempéricos como a dissolução e a dispersão natural, regidos pela ação de ventos, correntes e marés na coluna d'água também foram fatores importantes na redução da massa de óleo na superfície da água ao final do período simulado, com aproximadamente 45% do processo de intemperismo.

Observa-se também que, em ambos os cenários, o volume do óleo na costa foi muito pequeno, sendo difícil visualizar no gráfico. Entretanto, na Tabela 10 são apresentados os volumes finais que chegam à costa, a partir dos quais se estimou que cerca de 0,01% do todo o volume de óleo considerado nas simulações de pior caso por cenário de menor tempo na costa, ficou retido na costa em ambos os períodos simulados.

Pode-se verificar, também, que pelo somente cerca de 1% do volume de óleo derramado foi estimado estar na superfície da água ao final da simulação.

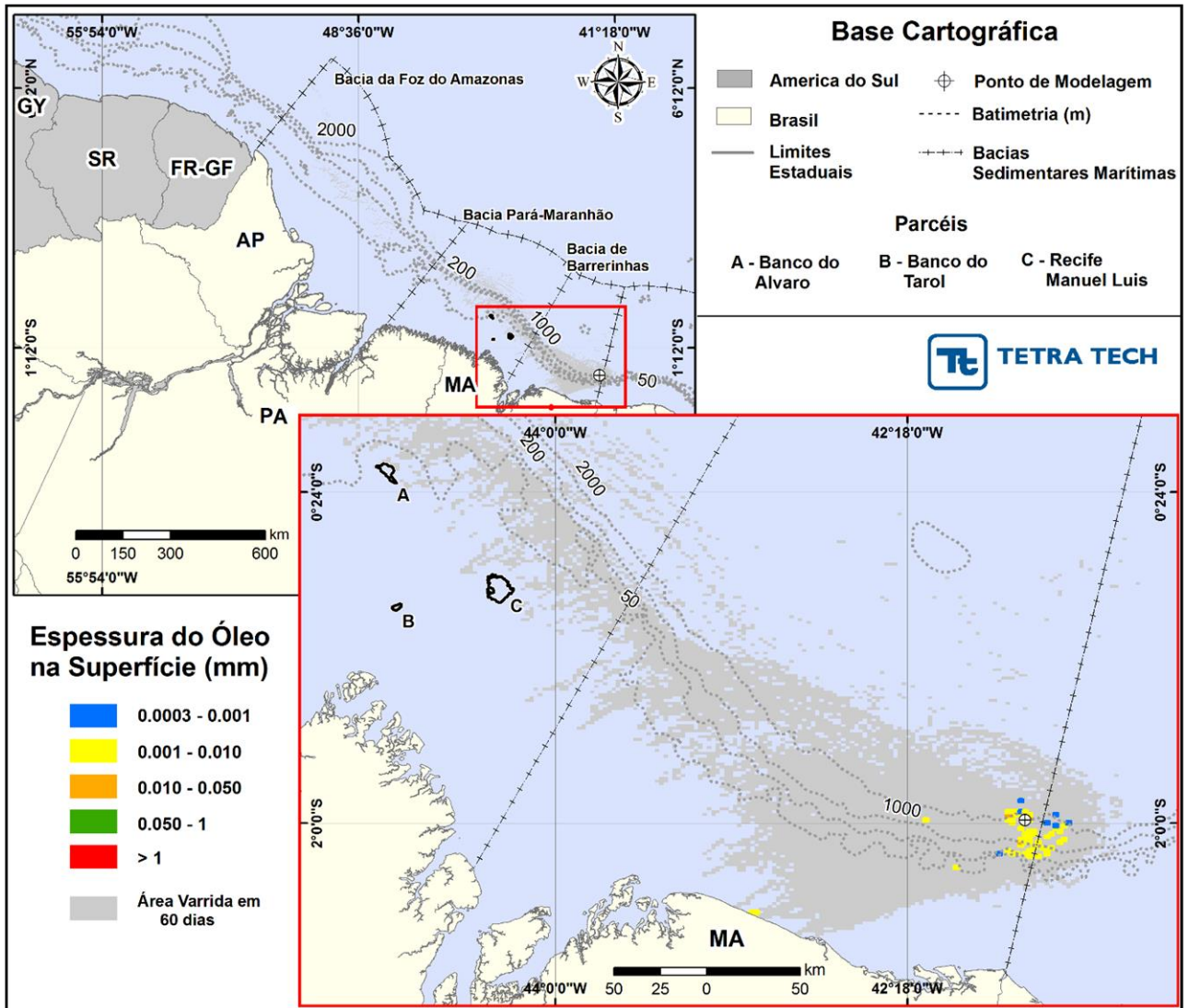


Figura 26 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER: Cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,10 m³ (vazamento contínuo por 30 dias).

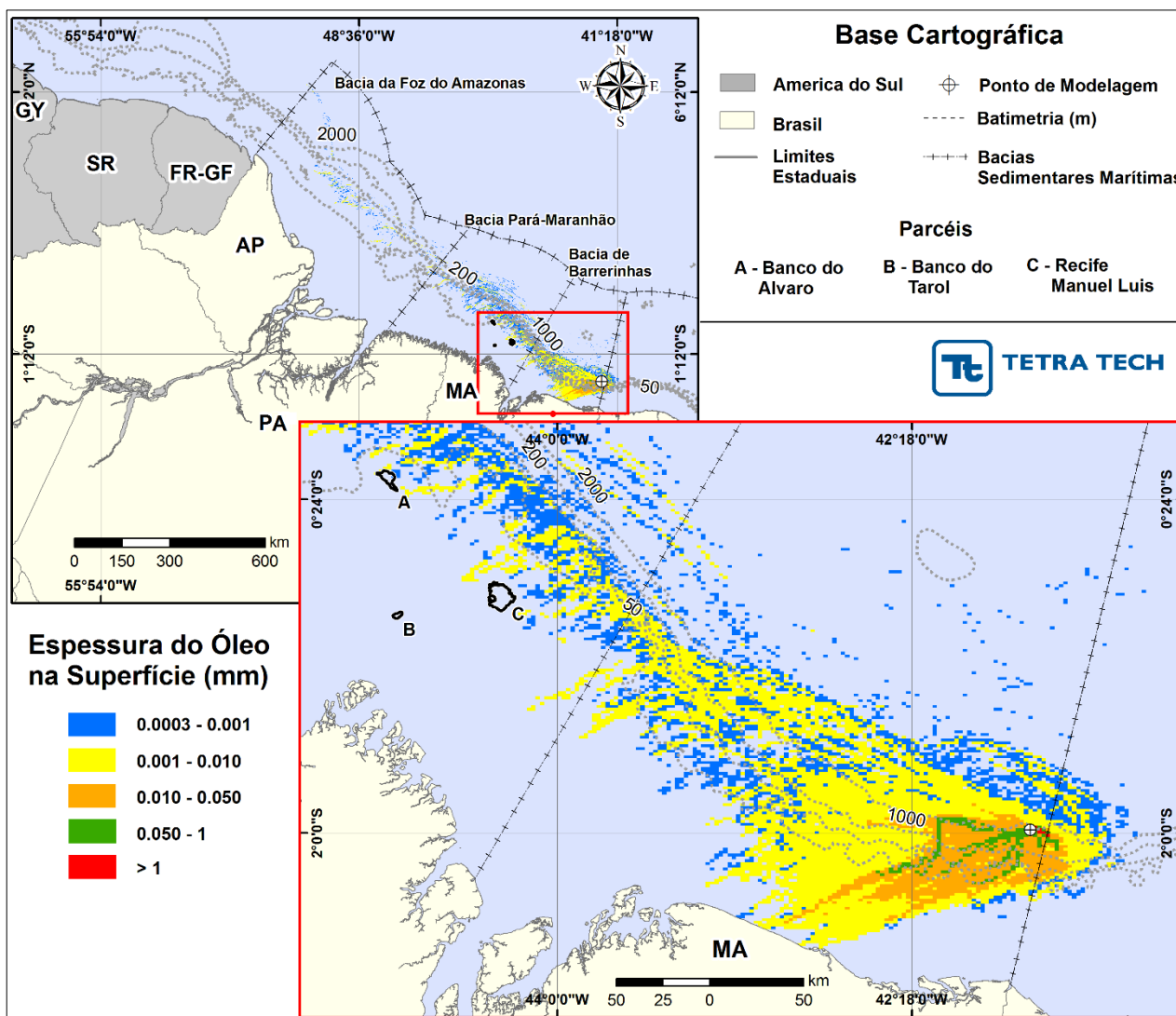


Figura 27 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

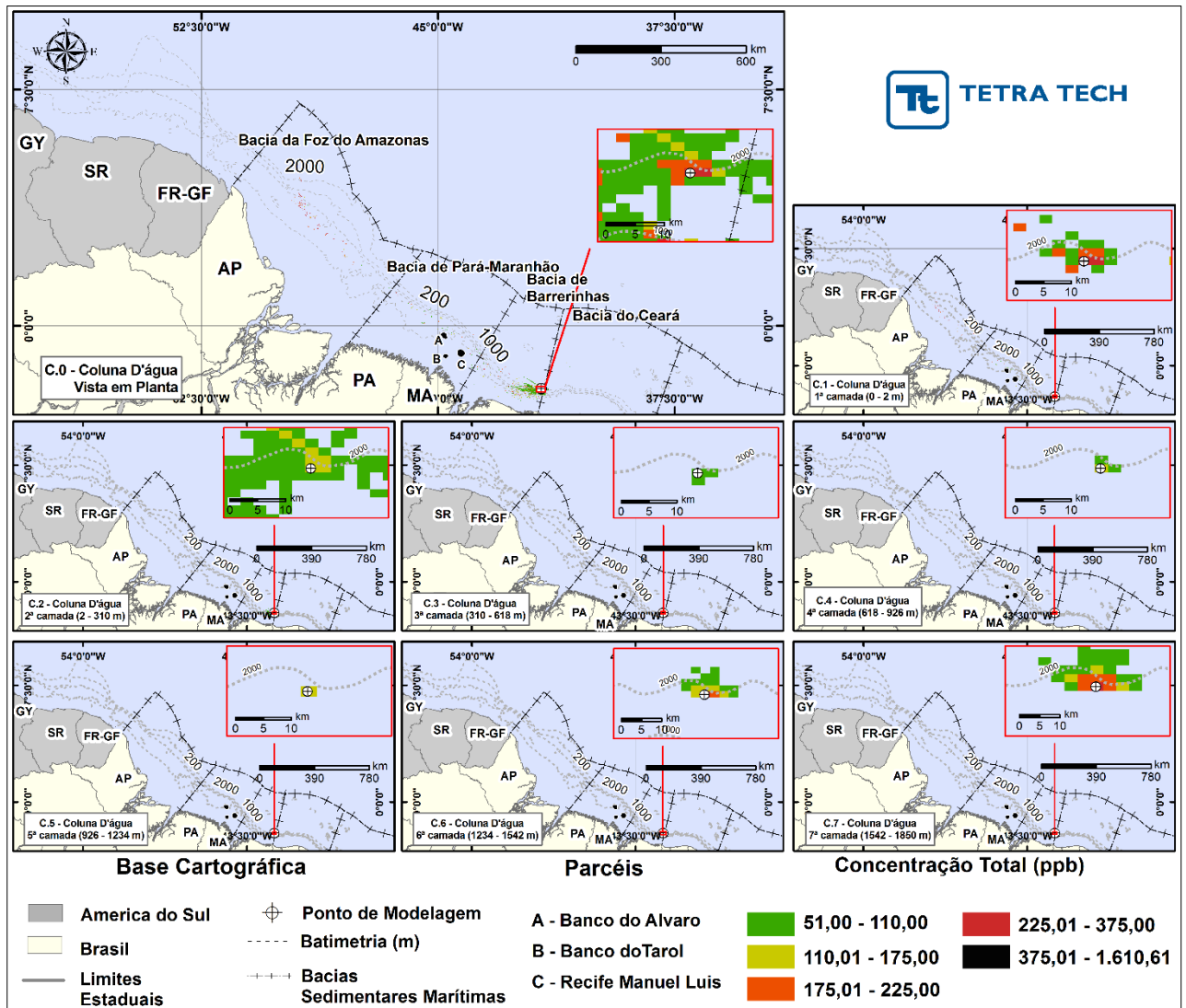


Figura 28 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

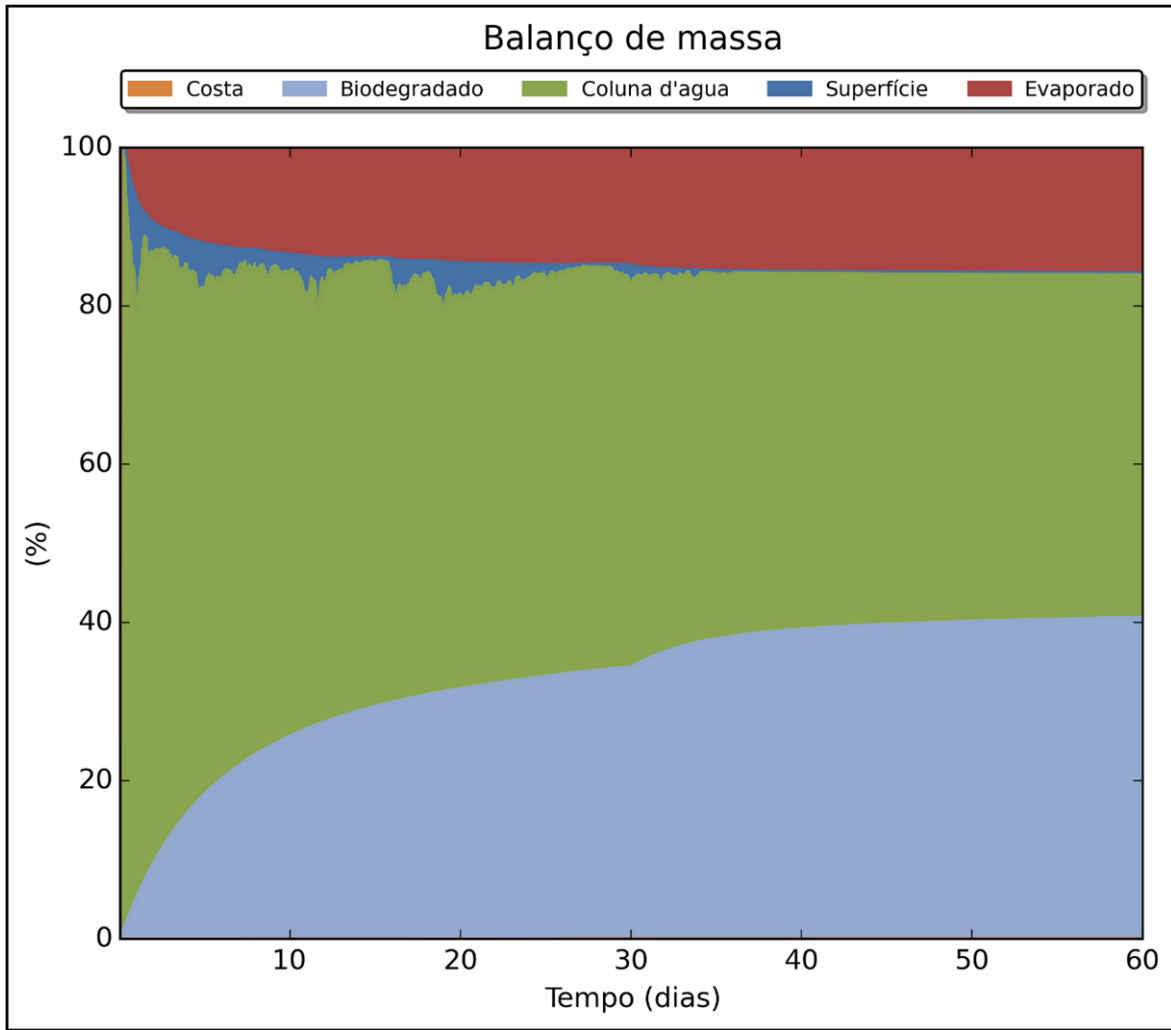


Figura 29 - Balanço massa para o cenário DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_VER.

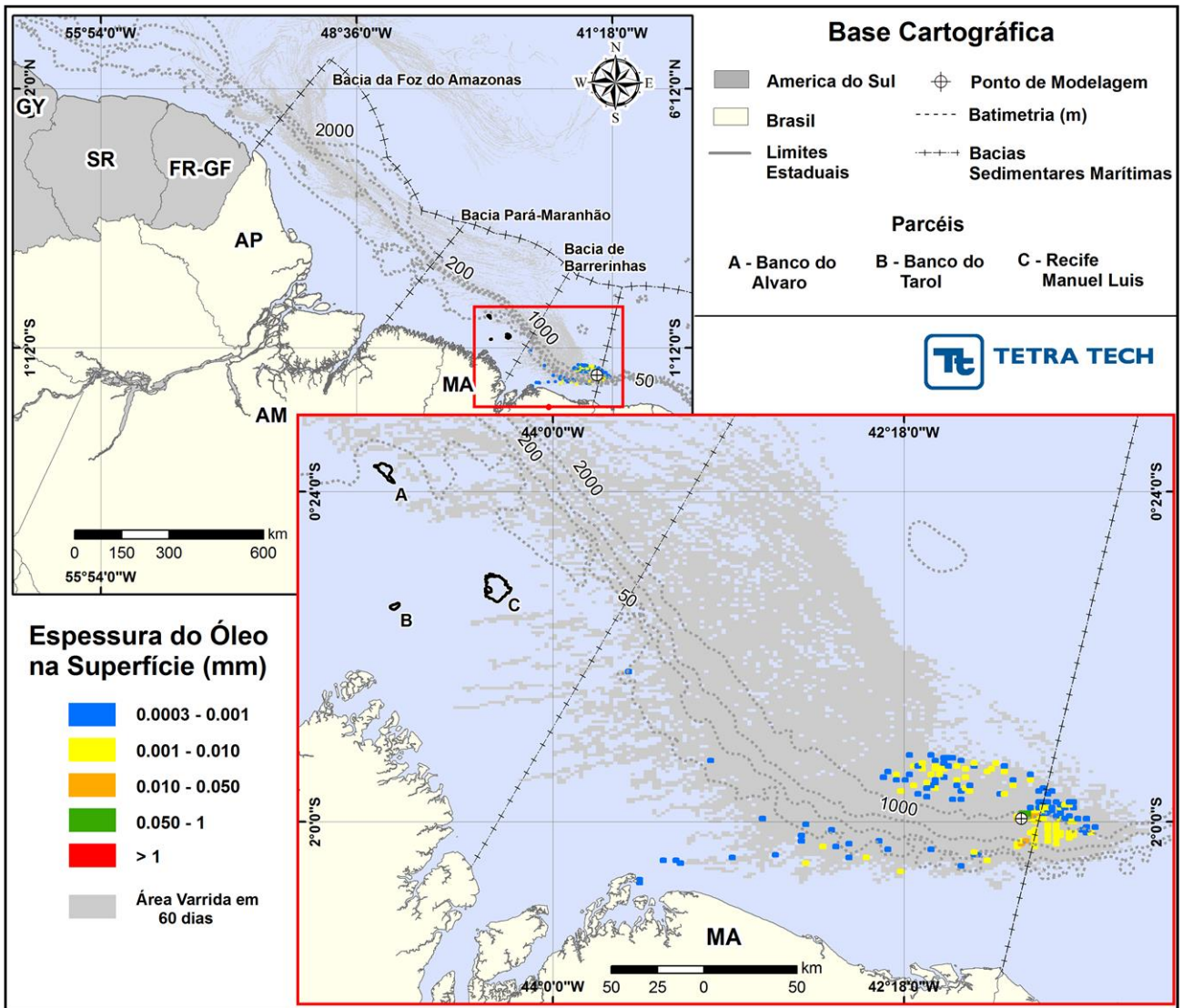


Figura 30 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV: Cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,10 m³ (contínuo por 30 dias).

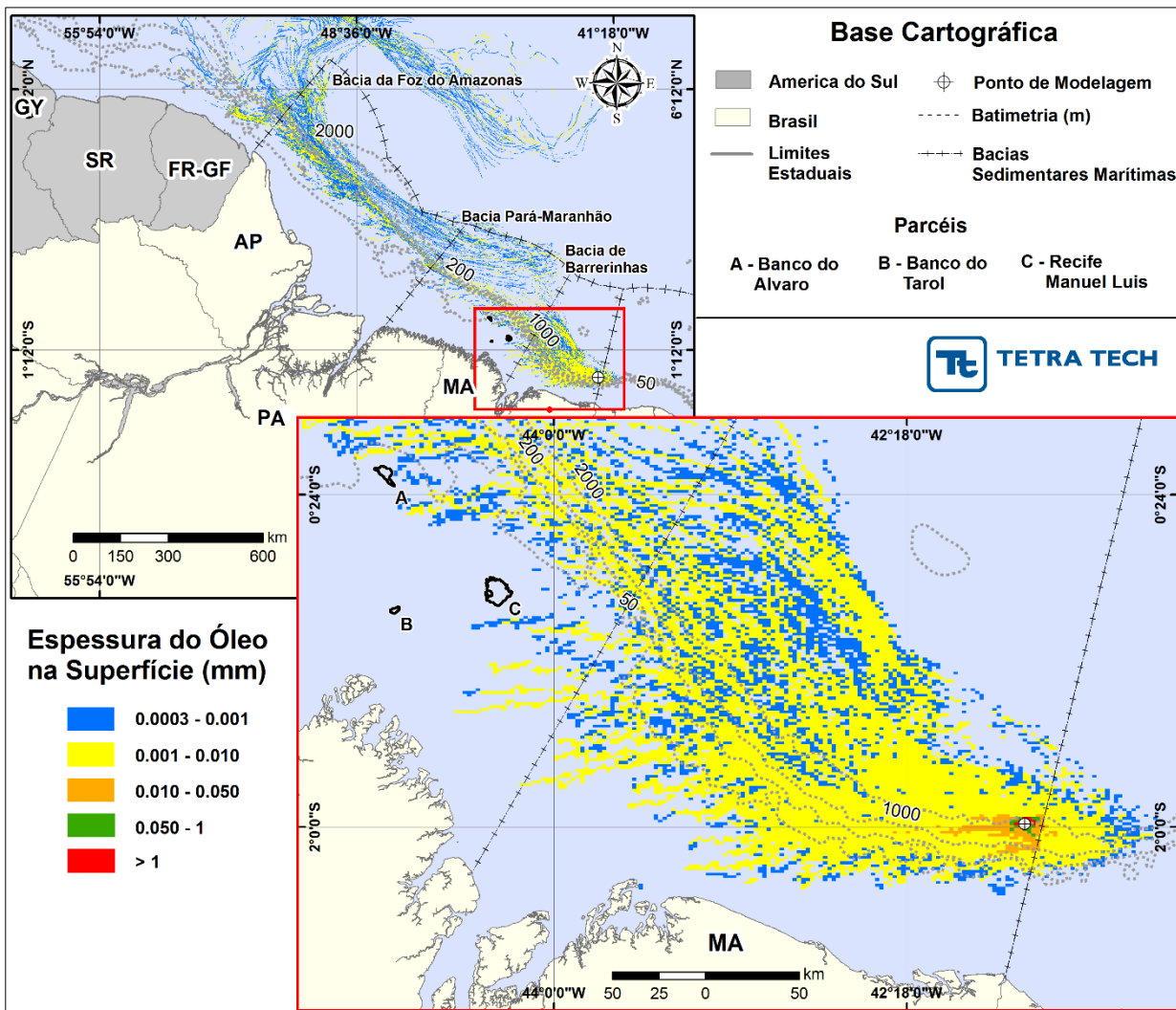


Figura 31 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área varrida), do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

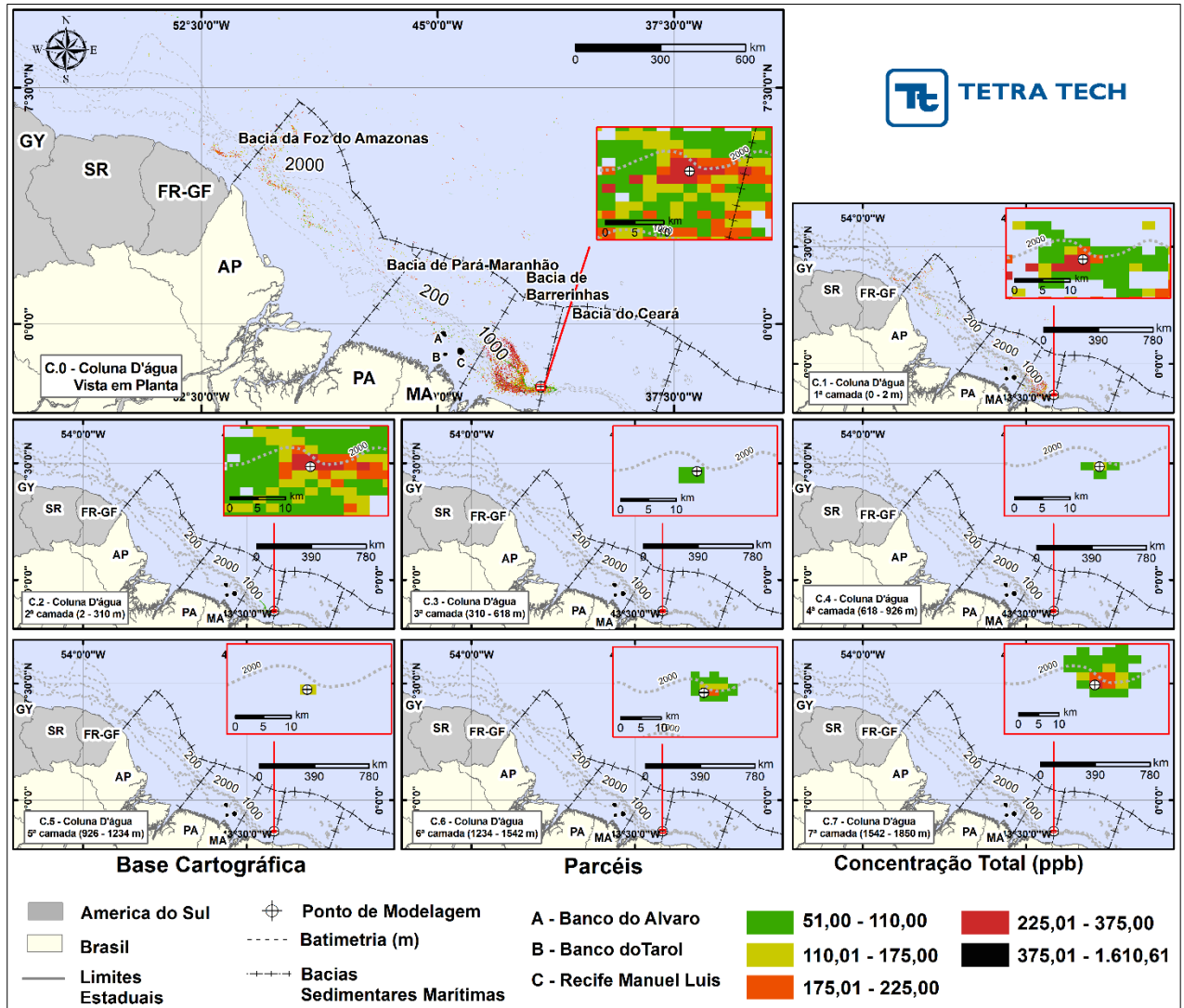


Figura 32 - DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de menor tempo de toque, 60 dias após um cenário ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

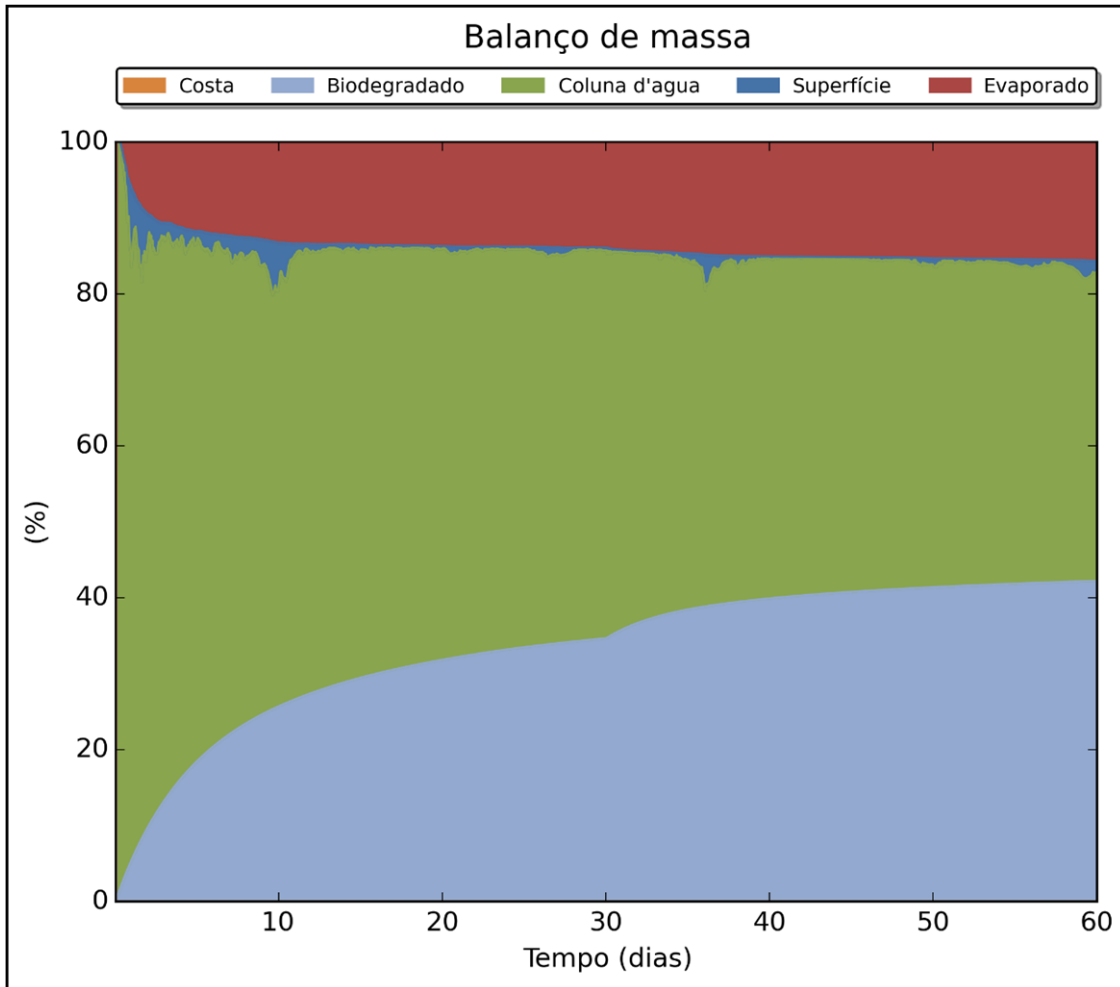


Figura 33 - Balanço massa para o cenário DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_INV.

3.2.1.1. Condições Meteorológicas e Oceanográficas - Simulações Determinísticas de Menor Tempo

A seguir, são apresentadas as figuras das condições meteorológicas e oceanográficas que atuaram nos cenários determinísticos críticos e que propiciaram a chegada do óleo mais rapidamente a costa para ambos os cenários de pior caso simulados.

Da Figura 34 até a Figura 36 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de menor tempo, com volume de pior caso (*blowout*), no período de verão. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante de primeiro toque do óleo na costa, em 171 horas no Município de Santo Amaro do Maranhão (MA).

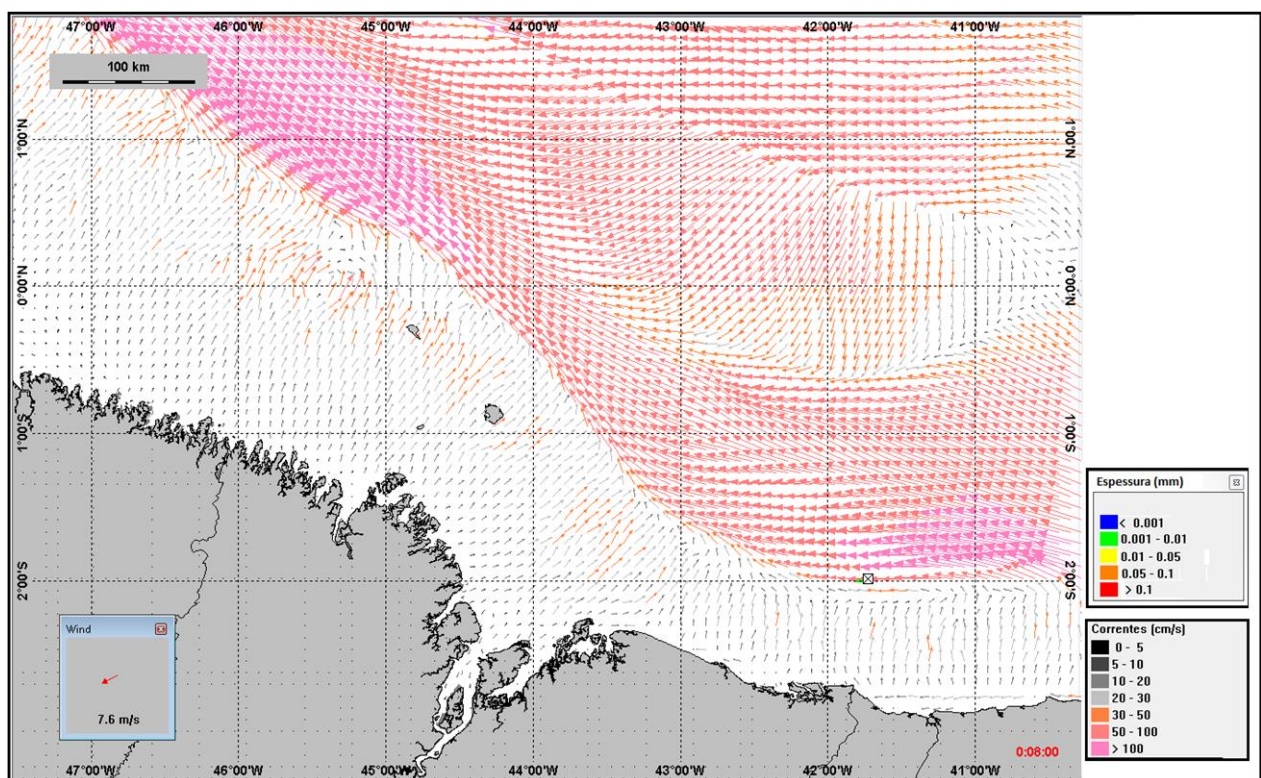


Figura 34 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (*blowout*), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-NE.

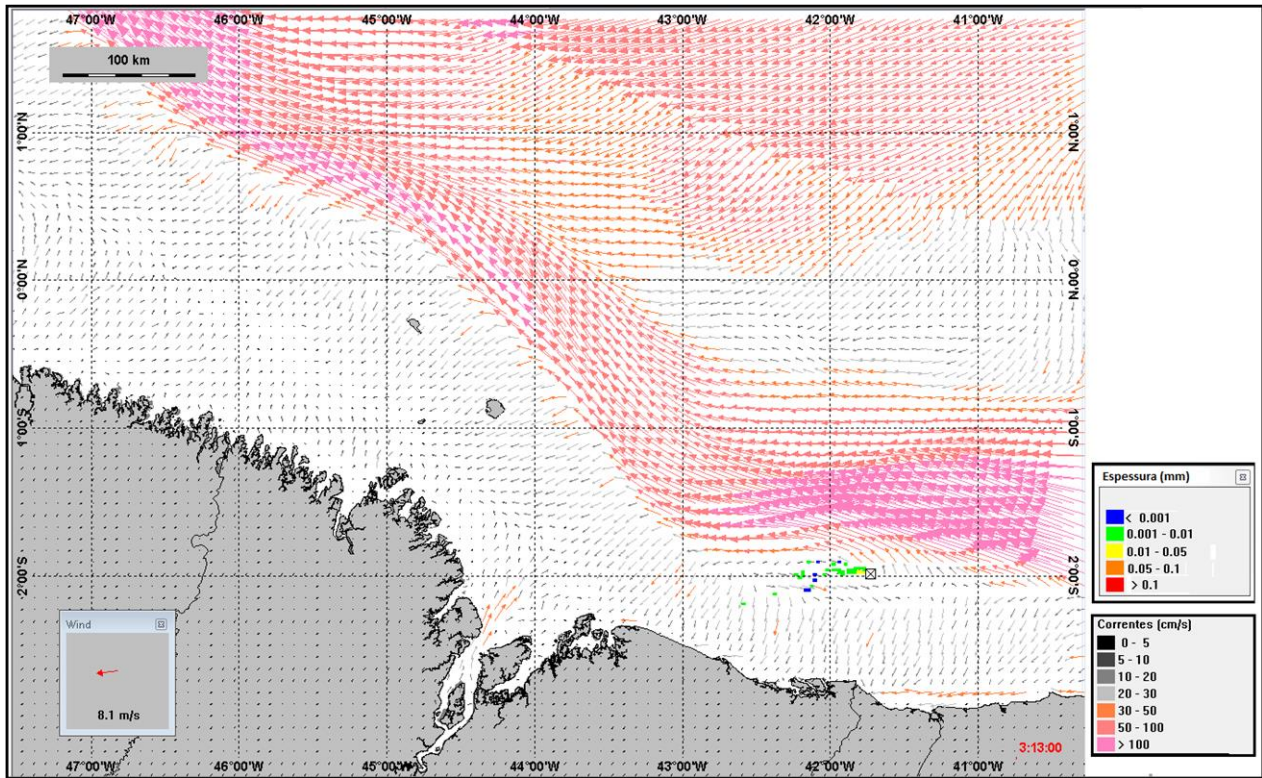


Figura 35 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

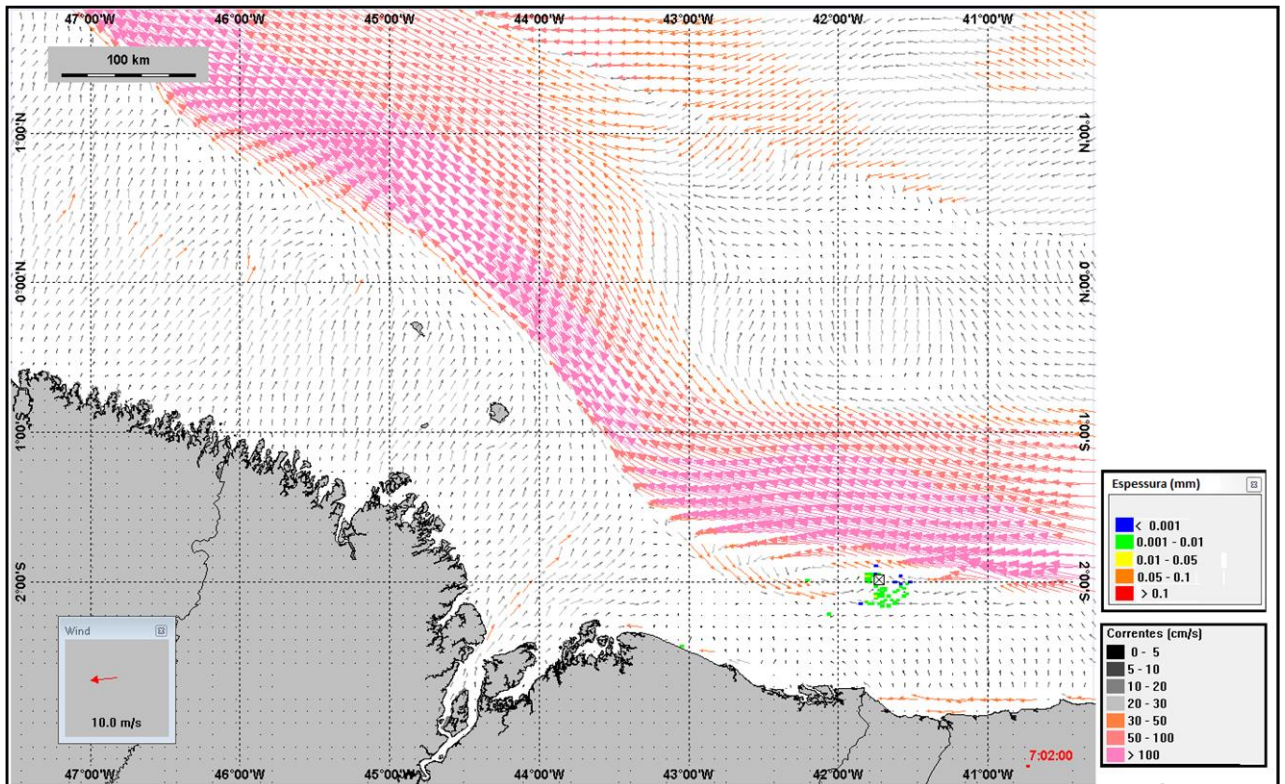


Figura 36 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (*blowout*), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

Da Figura 37 até a Figura 39 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de menor tempo, com volume de pior caso (*blowout*), no período de inverno. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante de primeiro toque do óleo na costa, em 239 horas no Município de Humberto de Campos (MA).

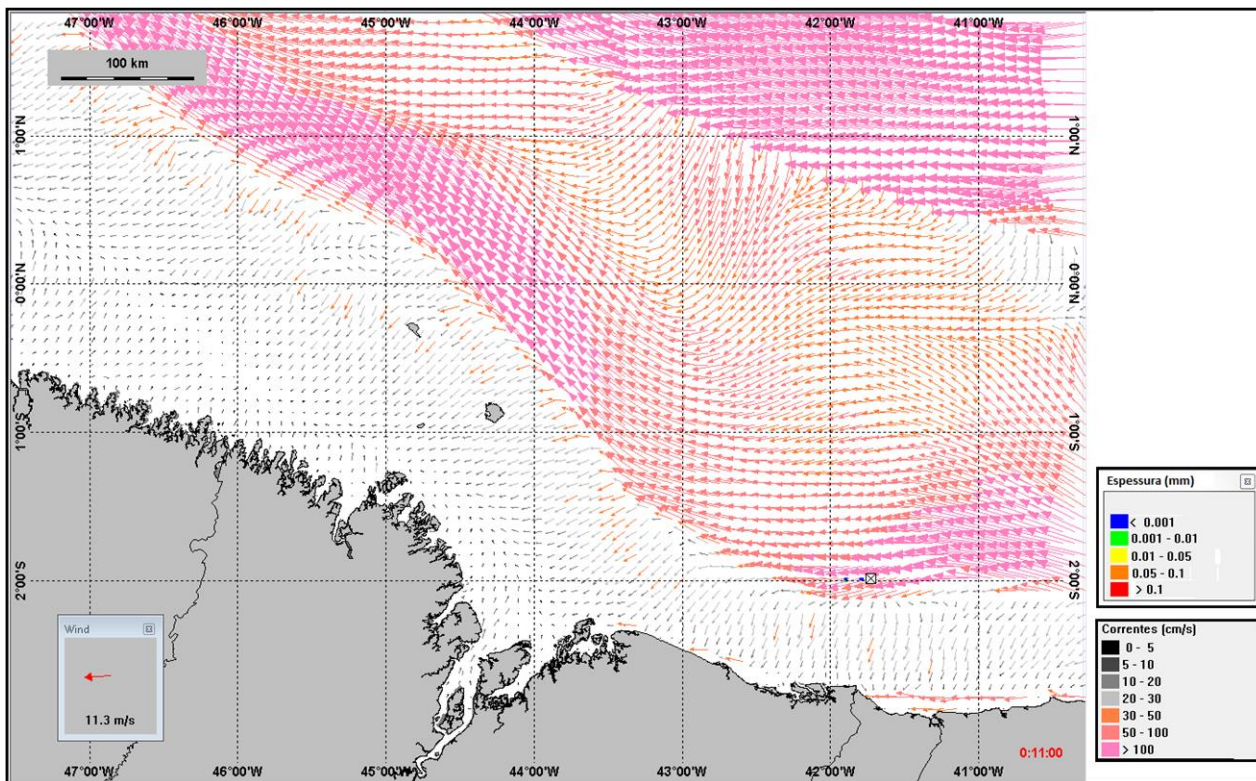


Figura 37 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.

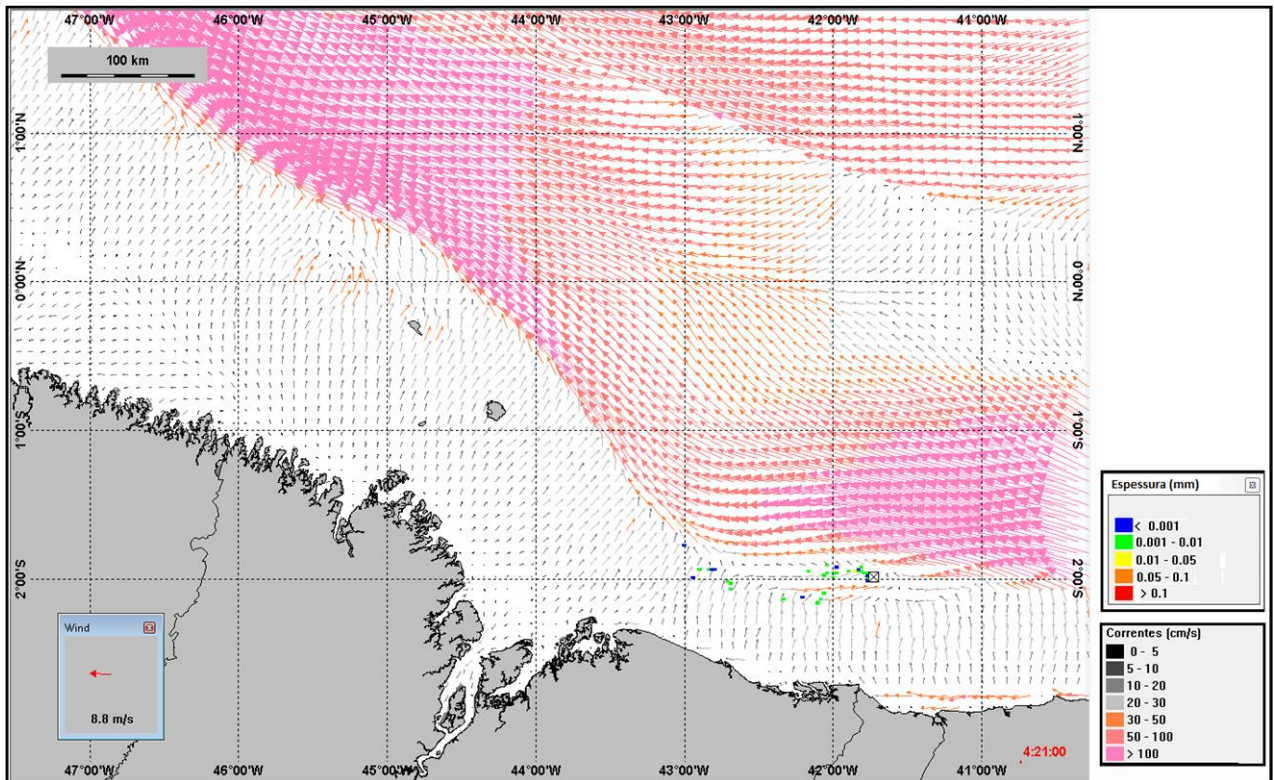


Figura 38 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

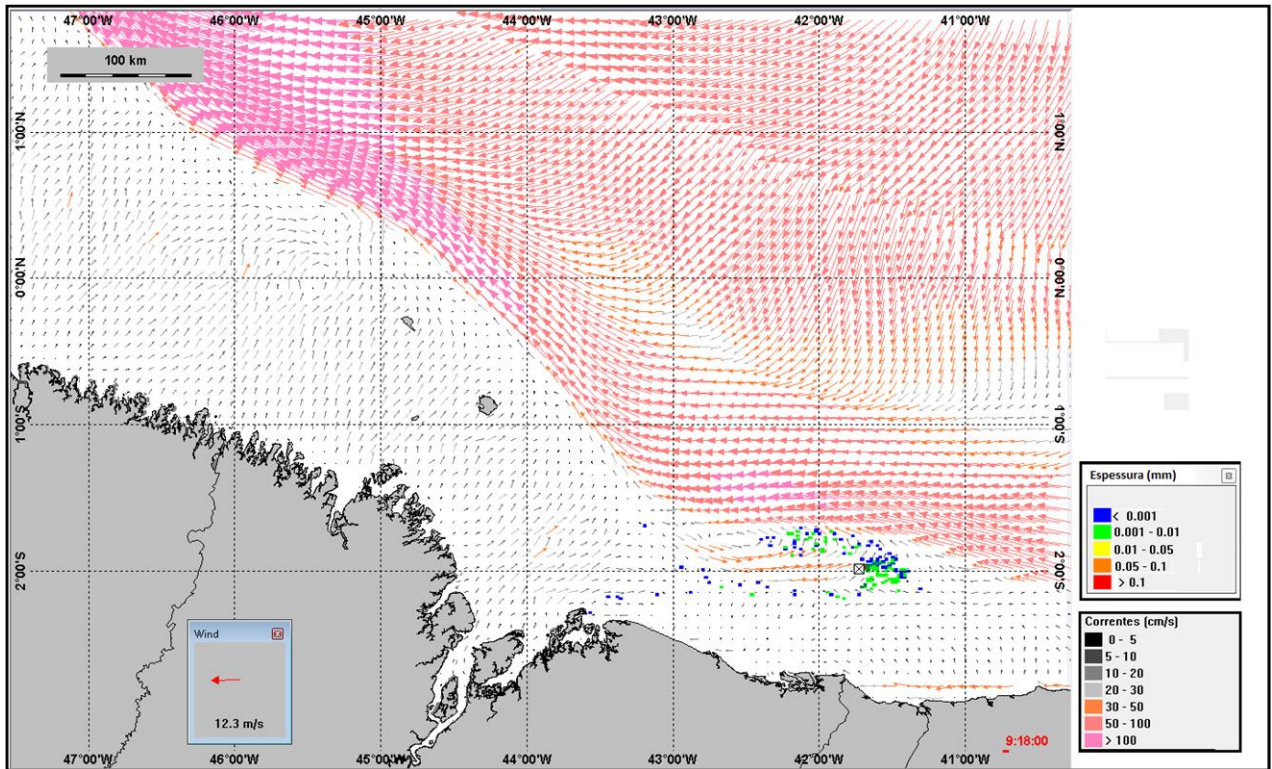


Figura 39 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-N; Vento-E.



3.2.2. Cenários Determinísticos Críticos – Maior Massa

A Tabela 12 apresenta um resumo dos cenários determinísticos críticos de maior massa na costa. Verifica-se que o maior volume final na costa foi de 5.630,0 m³ para o período de verão e de 101,0 m³ para o período de inverno. Ou seja, cerca de 11,1% e 0,2%, respectivamente, de todo o volume considerado nas simulações de pior caso foi estimado na costa ao final das simulações críticas de massa. Pode-se verificar, também, que somente cerca de 1% do volume de óleo derramado encontra-se na superfície da água ao final da simulação.

Tabela 12 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados à maior massa de óleo na costa.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	MUNICÍPIO DE PRIMIERO TOQUE	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m ³)
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER	18/04/2014 21:00hs	438,0	Humberto de Campos (MA)	5.630,0
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV	08/09/2014 19:00hs	343,0	Humberto de Campos (MA)	101,0

OBS: o volume de óleo final à costa é calculado com base na porcentagem do balanço de massa e volume inicial de derrame.

Na

Tabela 13 apresenta-se a área de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística de menor tempo de toque. Observa-se que durante o período de inverno a área de dispersão do óleo foi superior, cobrindo uma área de 211.368,0 km². Durante o período de verão, a área foi de 31.309,0 km².



Tabela 13 - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.

CENÁRIOS	ÁREA DE DESLOCAMENTO DO ÓLEO AO LONGO DE TODA A SIMULAÇÃO (Km ²)
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER	31.309,0
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV	211.368,0

Da Figura 40 a Figura 47 são apresentados os resultados determinísticos críticos de maior massa na costa para os derrames com volume de pior caso (50.720,0 m³). Analisando os gráficos de balanço de massa destas simulações, observa-se que a biodegradação e a interação com a coluna d'água foram os processos intempéricos mais importantes na redução do óleo ao final do período simulado. Por se tratar de um derrame de fundo em grandes profundidades, o óleo sofre um processo de biodegradação ao longo de toda a coluna da água.

Pode-se observar também um significativo aumento do volume do óleo na costa principalmente no período de verão, quando comparado com os cenários determinísticos de menor tempo. Entretanto, mesmo estes sendo os cenários mais críticos em termos de massa na costa, observa-se que a maior porcentagem do óleo sofreu intemperismo devido aos processos de biodegradação (aproximadamente, 40%), e evaporação e interação com a coluna da água (aproximadamente, 50%).

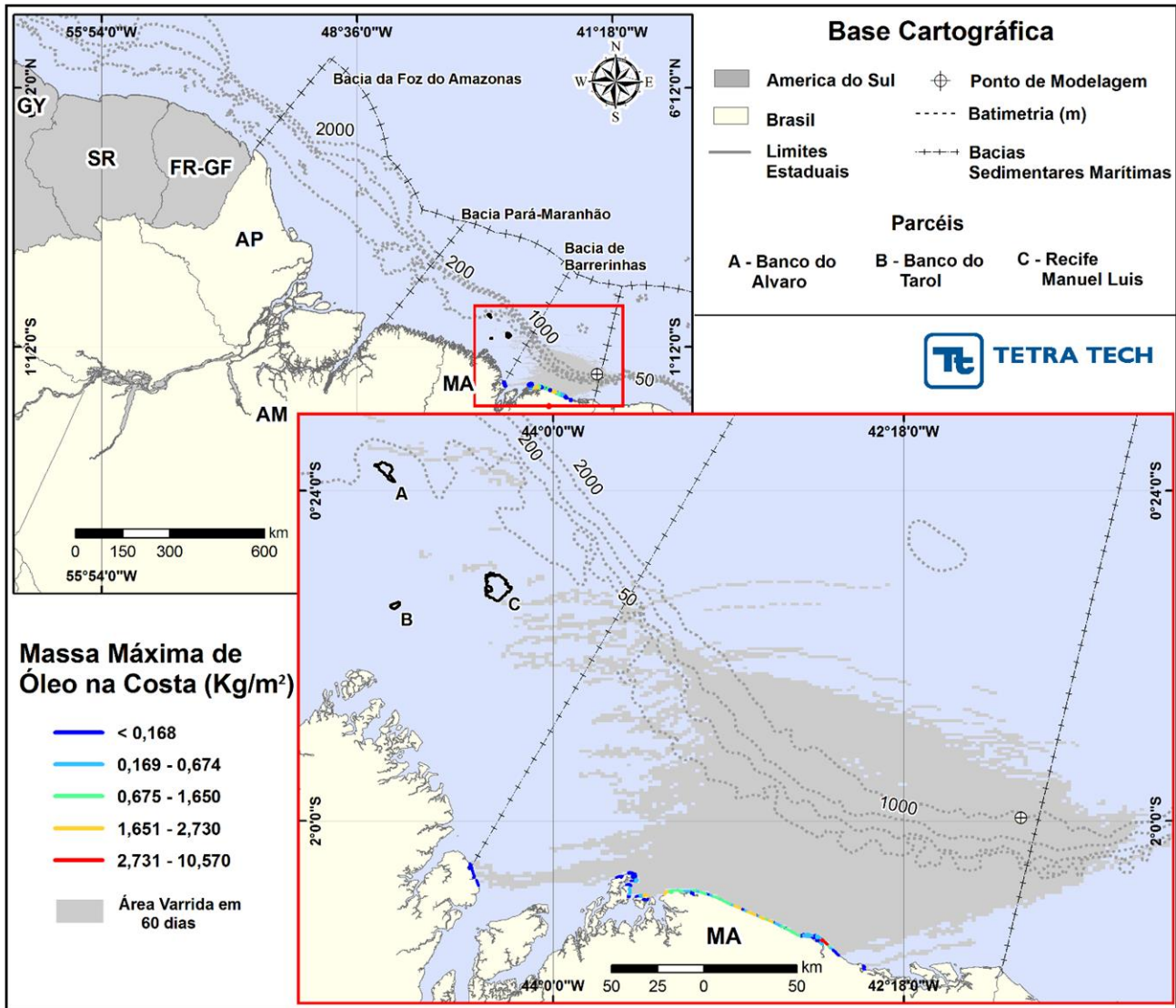


Figura 40 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER: Cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,10 m³ (contínuo por 30 dias).

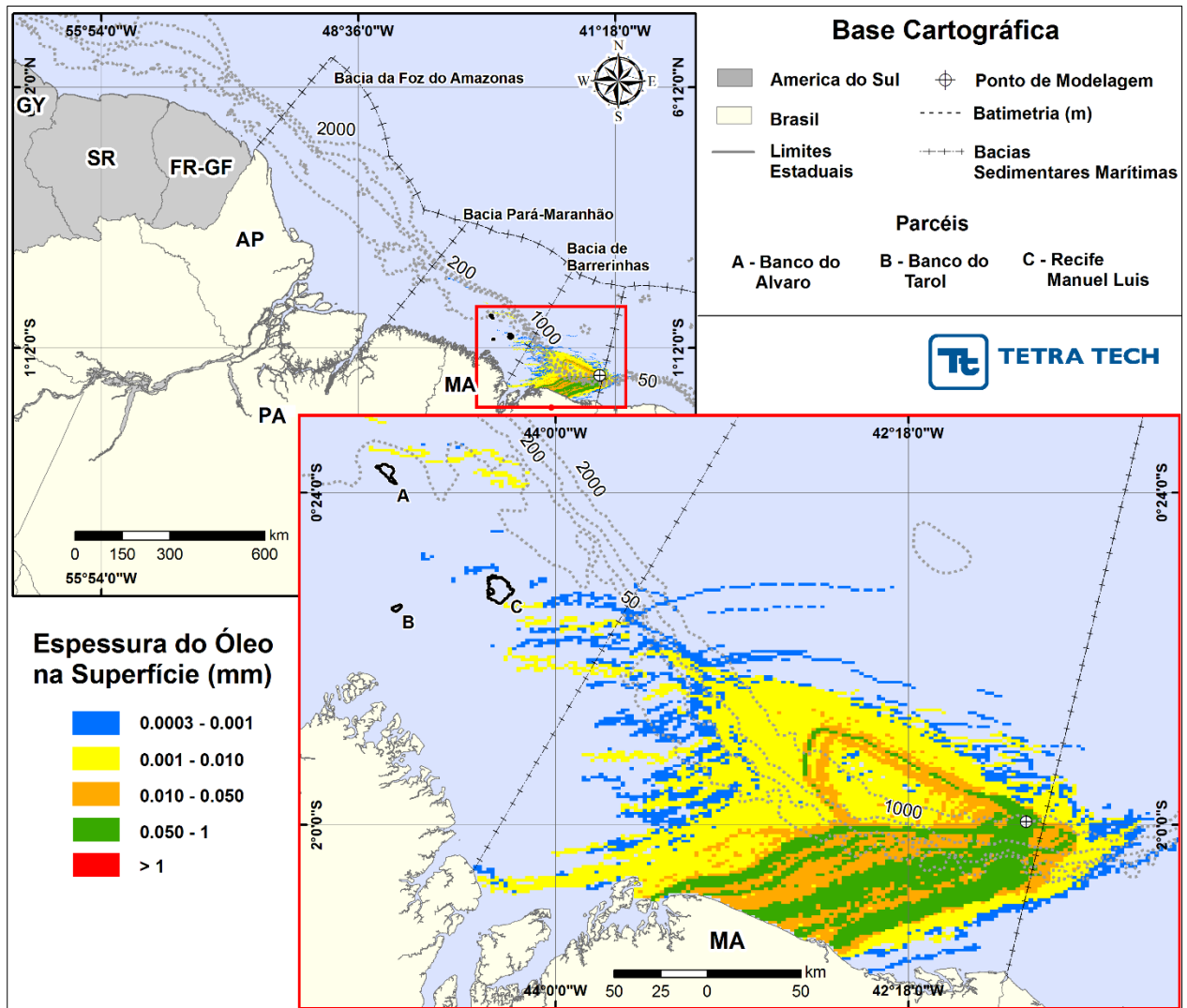


Figura 41 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

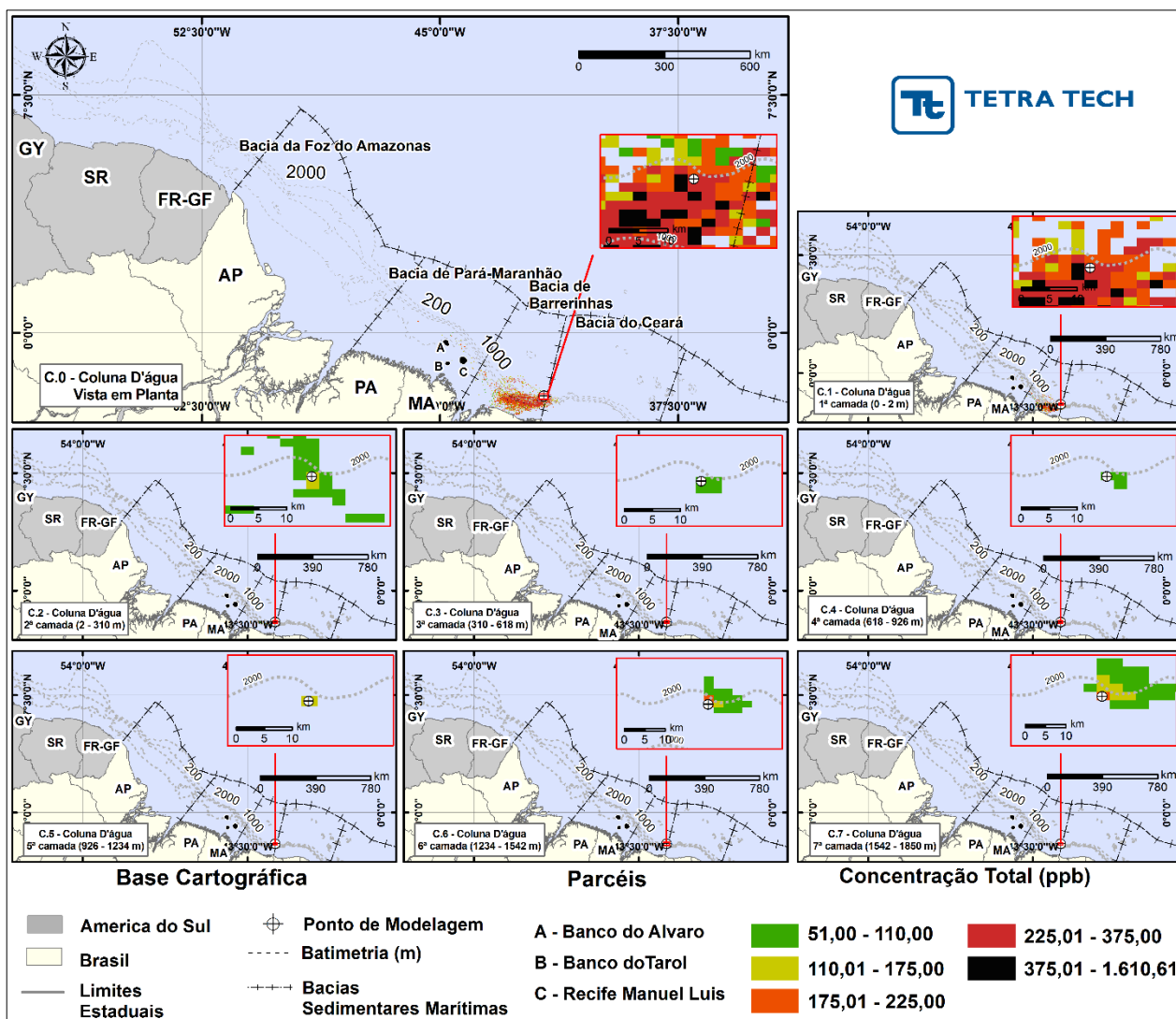


Figura 42 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um cenário ocorrido no bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

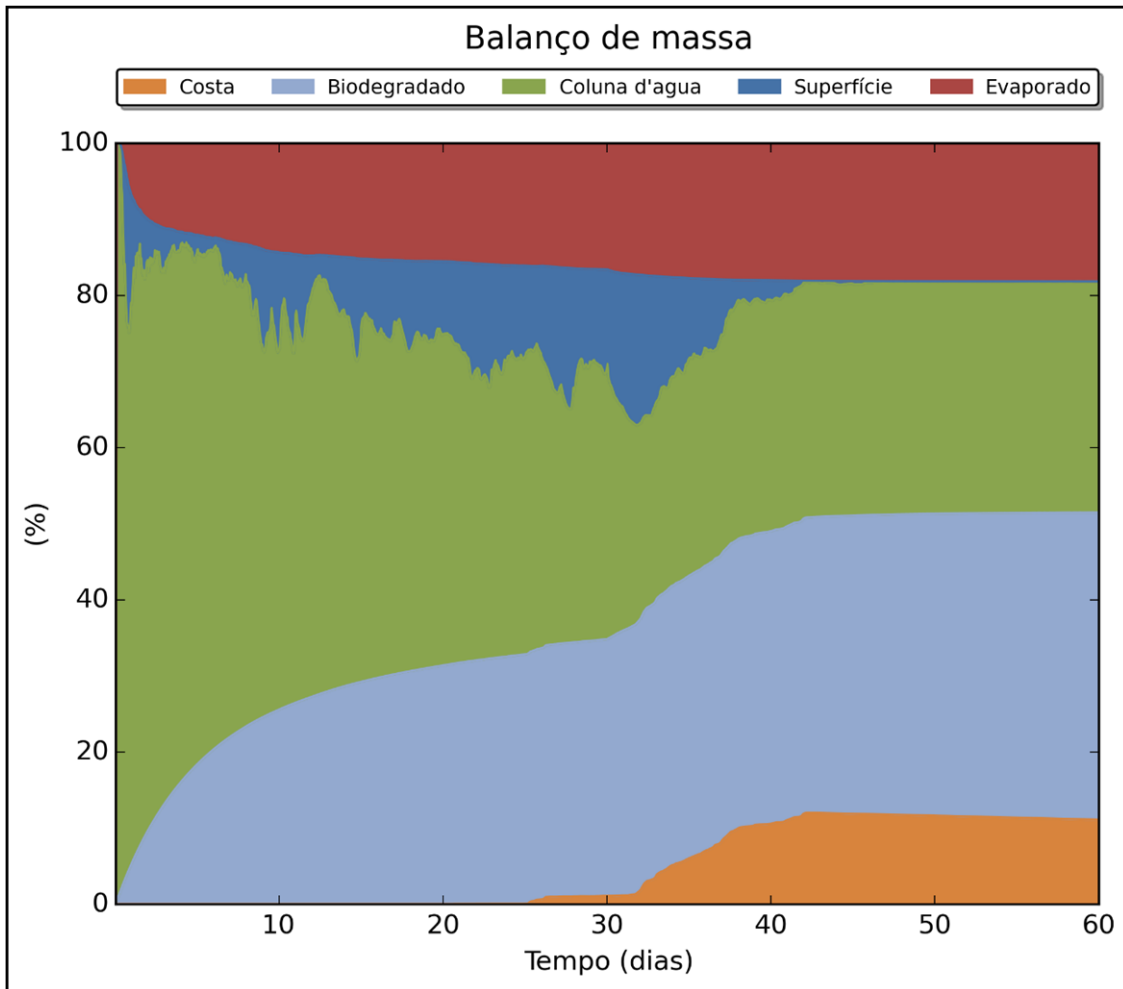


Figura 43 - Balanço massa para o cenário DET_MASSA_BAR_M_346_PC_VER.

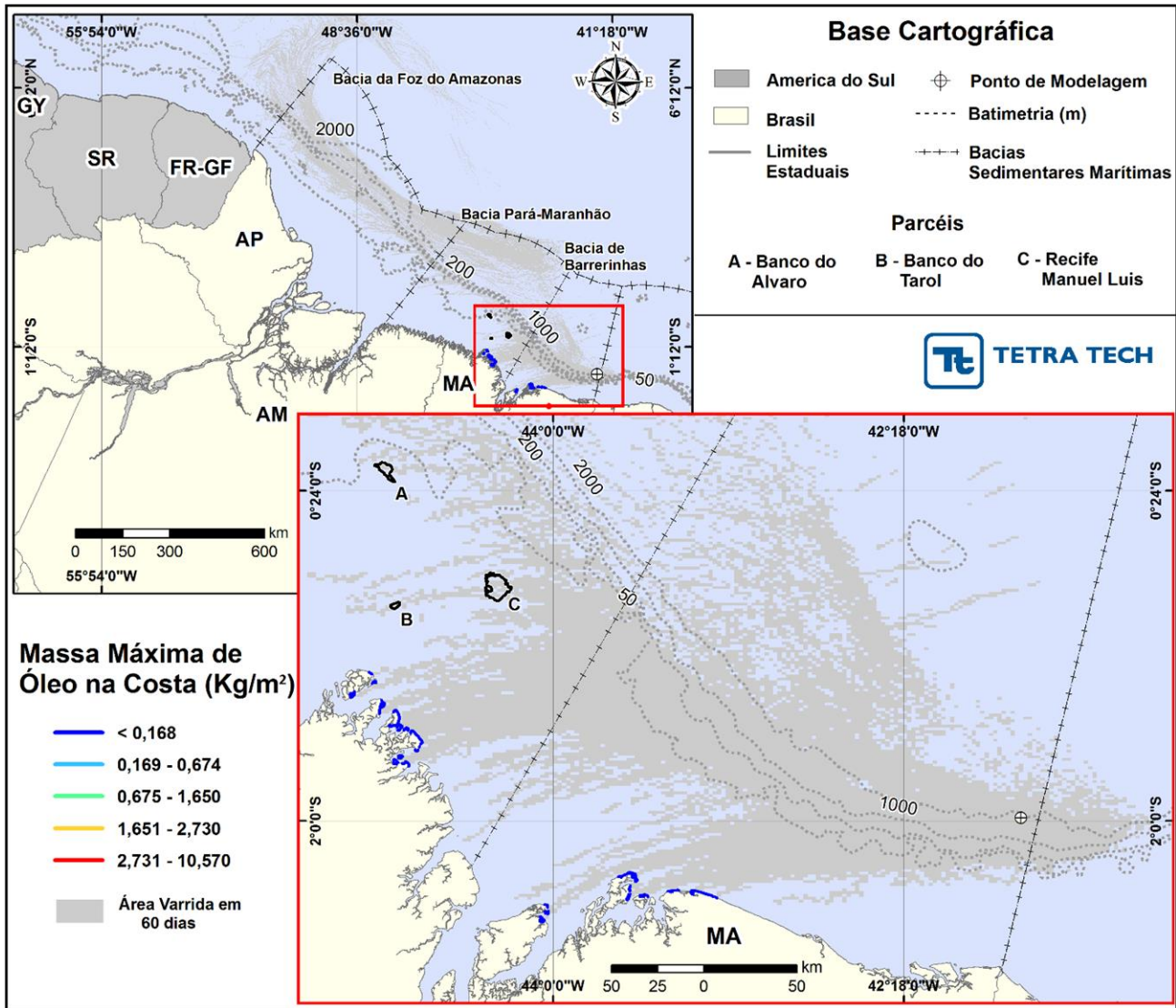


Figura 44 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV: Cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,10 m³ (contínuo por 30 dias).

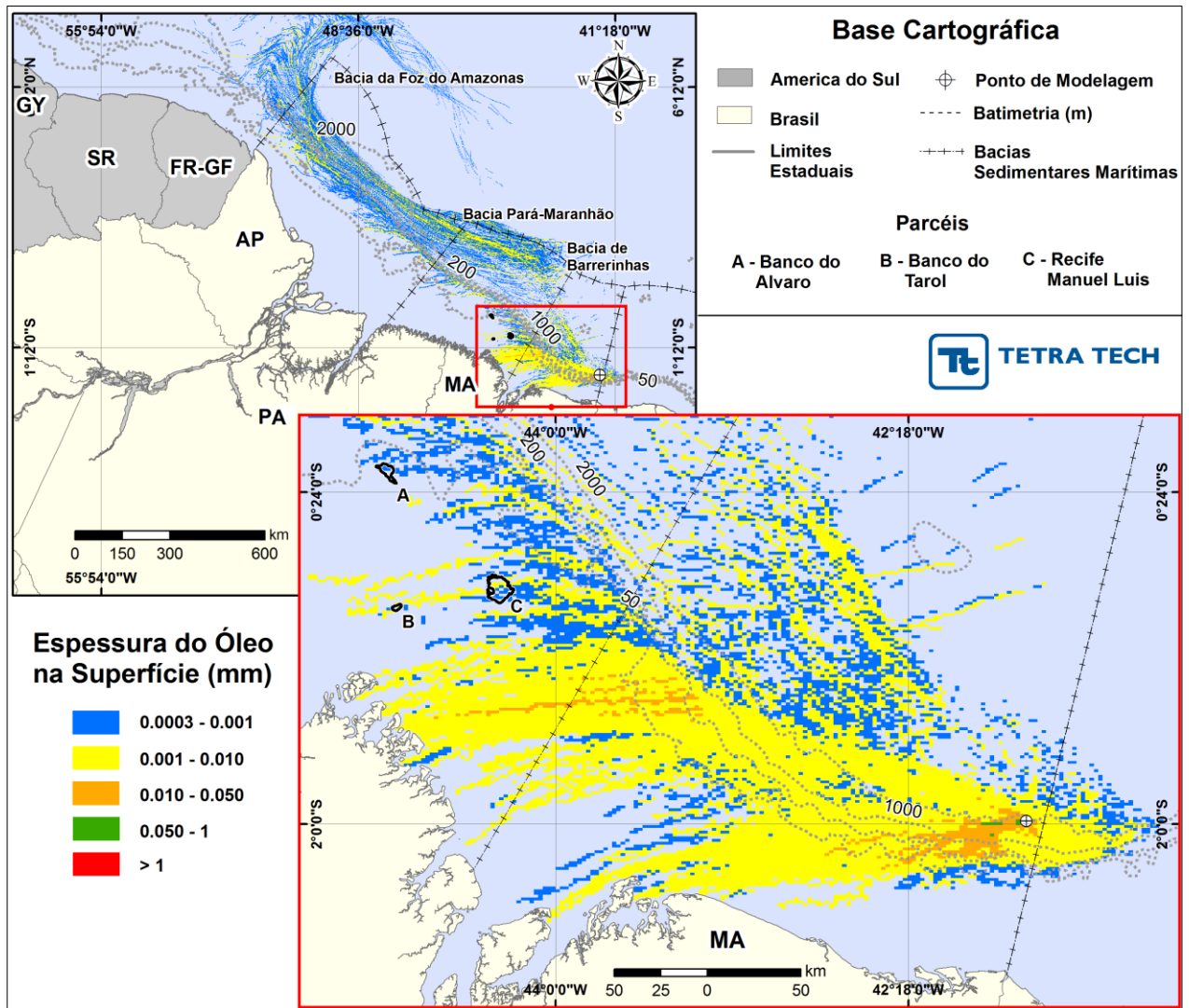


Figura 45 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

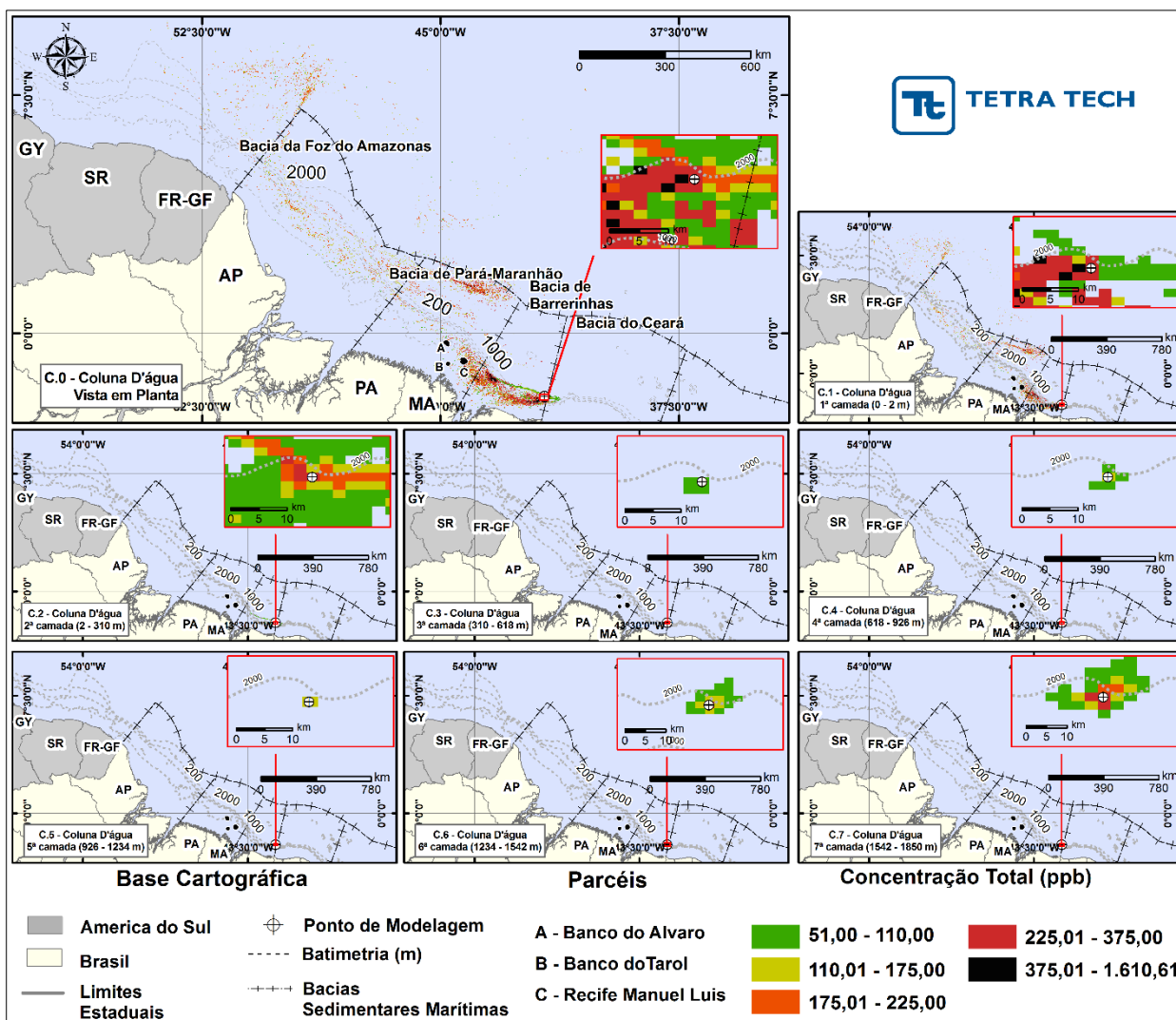


Figura 46 - DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de maior massa de óleo na costa, 60 dias após um cenário ocorrendo no bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 50.720,1 m³ (contínuo por 30 dias).

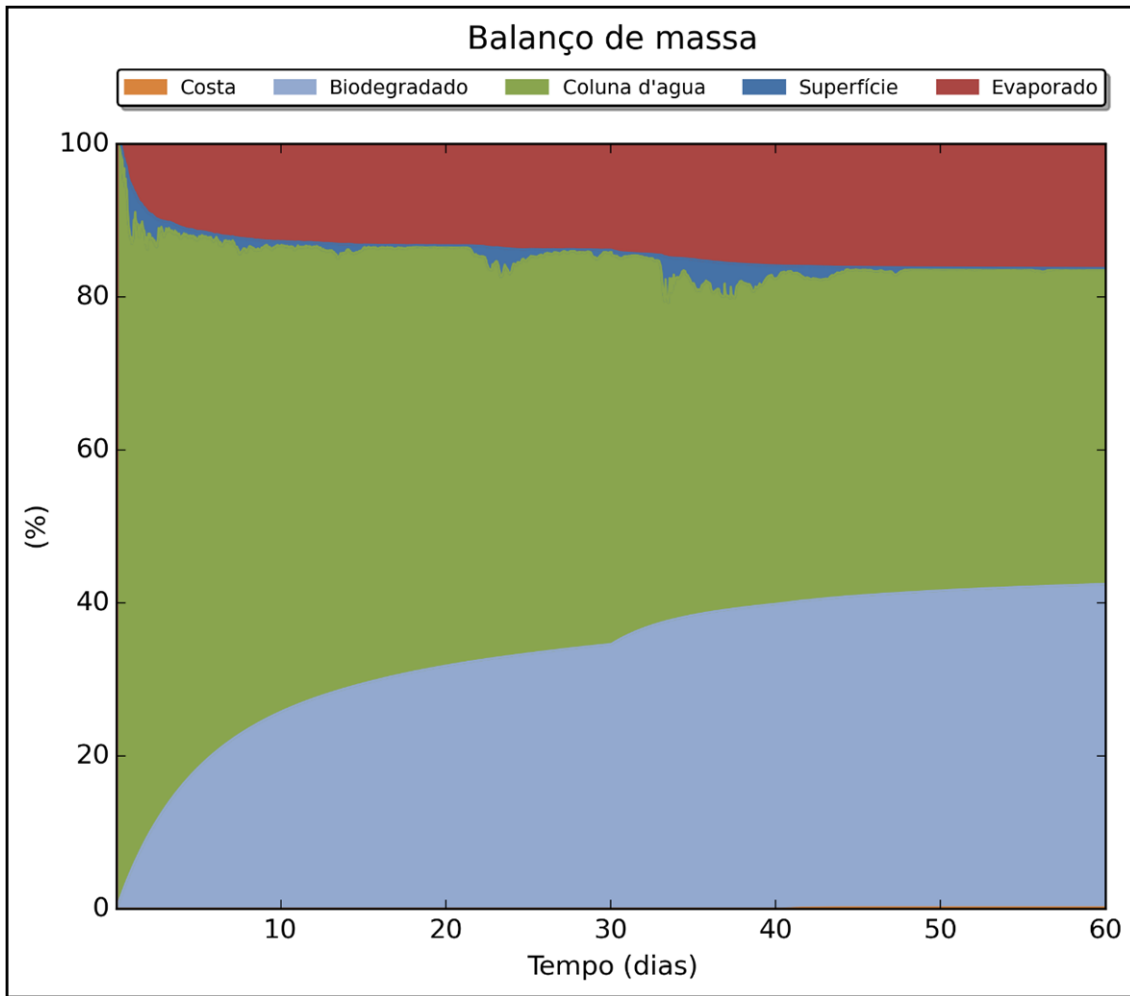


Figura 47 - Balanço massa para o cenário DET_MASSA_BAR_M_346_PC_INV.

3.2.2.1. Condições Meteorológicas e Oceanográficas - Simulações Determinísticas de Maior Massa na Costa

A seguir, são apresentadas as figuras das condições meteorológicas e oceanográficas que atuam nos cenários determinísticos críticos e que propiciaram a chegada de maior massa de óleo a costa para ambos os períodos simulados, que no estudo em questão representam a hipótese de pior caso.

Da Figura 48 até a Figura 50 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de maior massa, com volume de pior caso (*blowout*) no período de verão. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante de primeiro toque do óleo na costa, em 438 horas no Município de Humberto de Campos (MA).

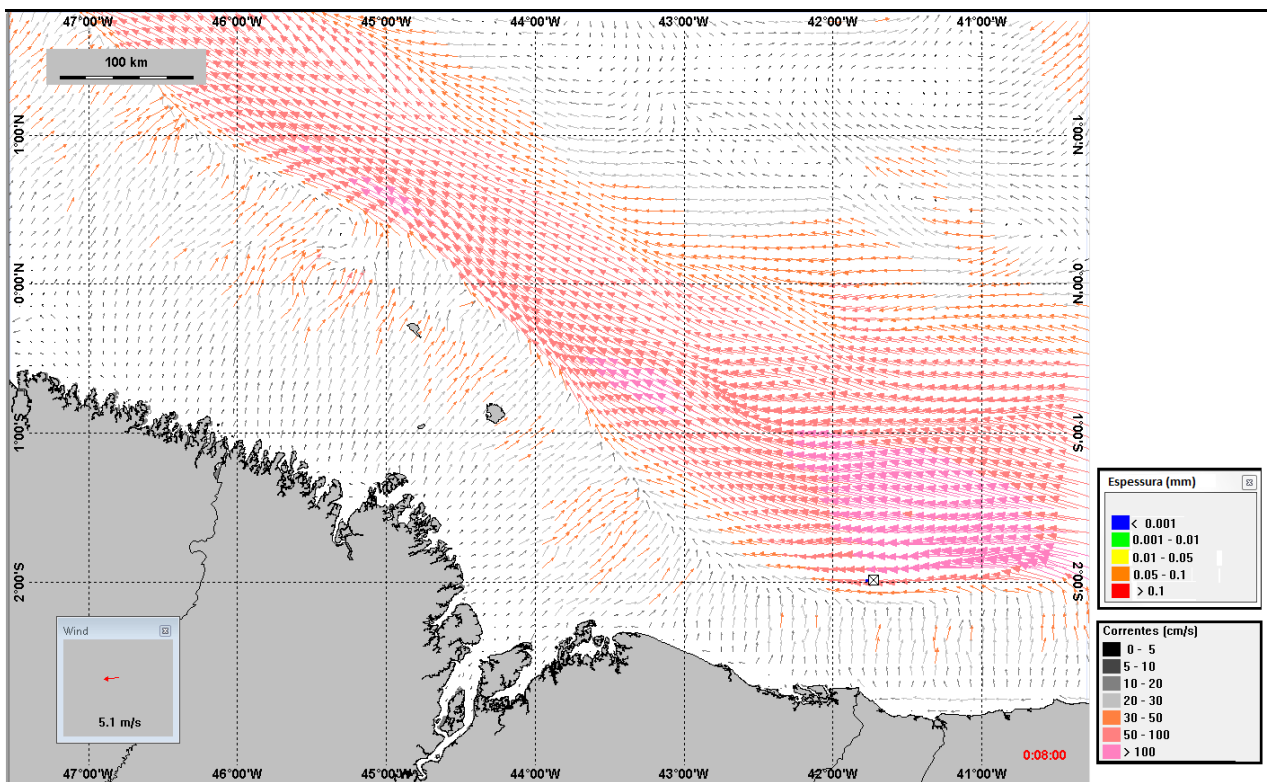


Figura 48 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (*blowout*), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.

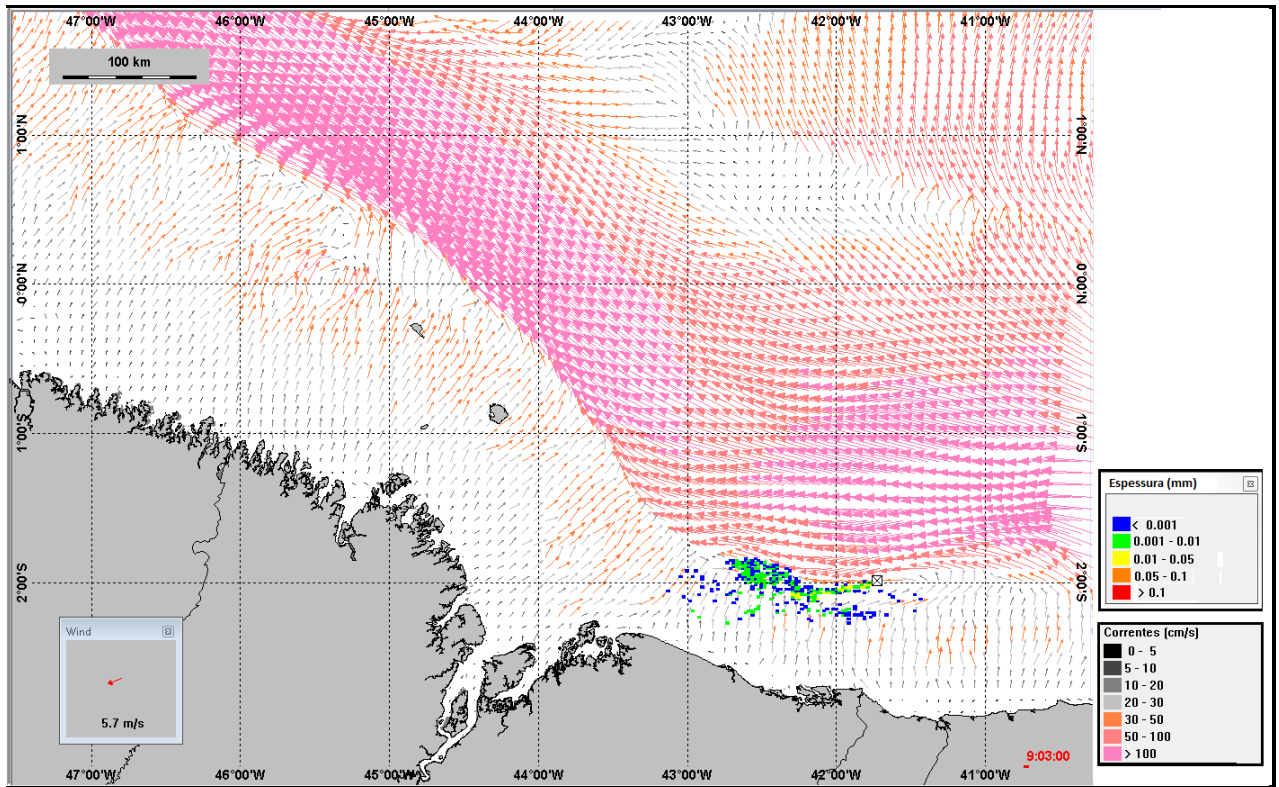


Figura 49 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-ENE.

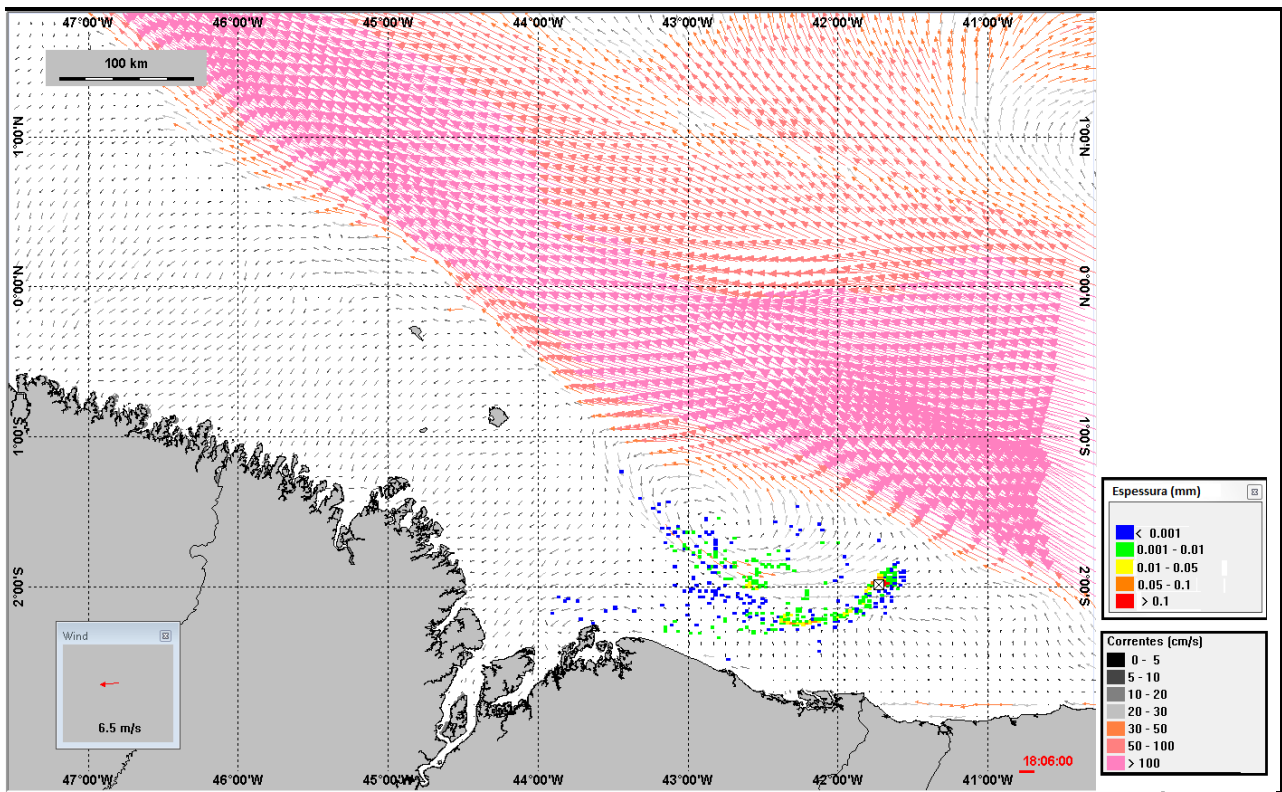


Figura 50 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque de óleo na costa da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-ENE; Vento-E.

Da Figura 51 até a Figura 53 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de maior massa, com volume de pior caso (afundamento de unidade) no período inverno. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante de primeiro toque do óleo na costa, em 343 horas no Município de Humberto de Campos (MA).

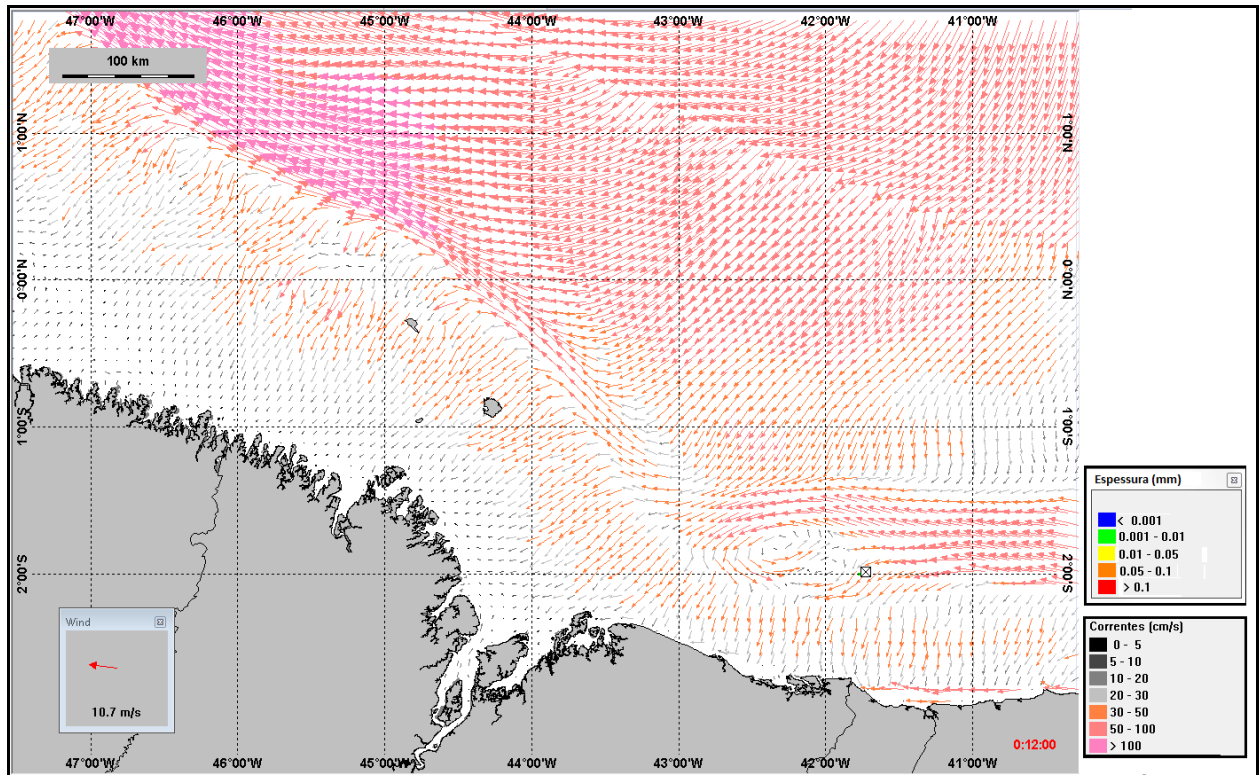


Figura 51 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-WSW; Vento-ESE.

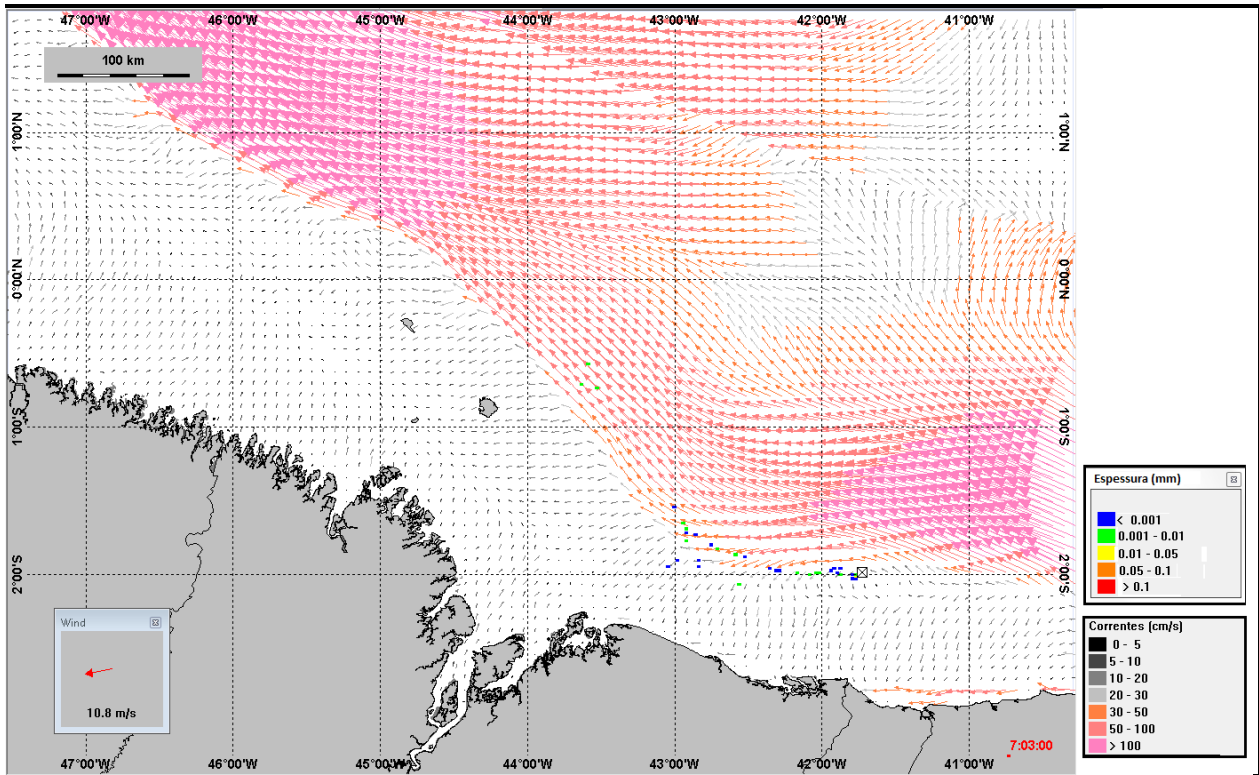


Figura 52 – Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

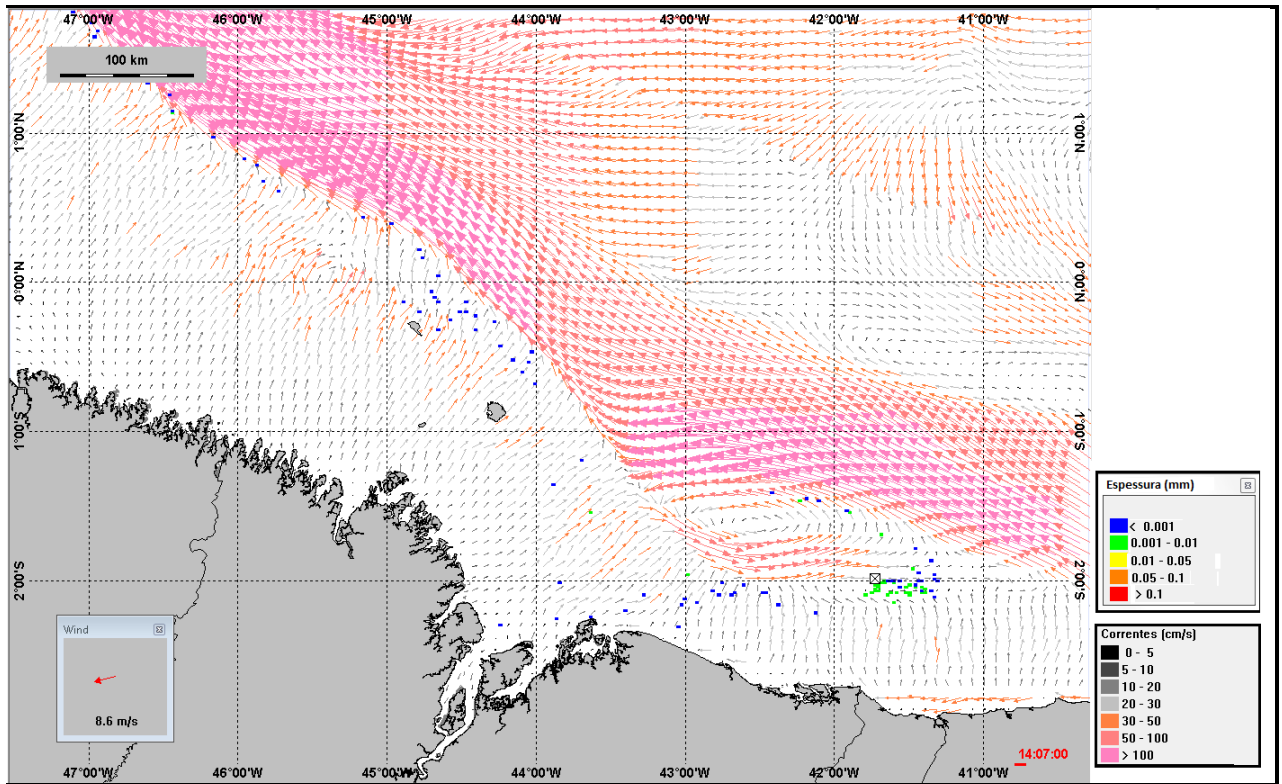


Figura 53 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de primeiro toque na costa da determinística crítica de maior massa, volume de pior caso (blowout), no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-E; Vento-E.

3.2.3. Cenários Determinísticos Críticos – Menor Distância da Costa

A Tabela 14 apresenta um resumo dos cenários determinísticos críticos de menor distância do óleo em relação à costa. Observa-se que os cenários de verão apresentaram menores distâncias em comparação aos cenários de inverno. Também se observa que os cenários de derrame de volume médio (200 m³) apresentaram distâncias inferiores aos cenários de derrames pequenos (8 m³), quando comparados para o mesmo período de simulação.

Tabela 14 - Resumo dos cenários determinísticos críticos associados à menor distância do óleo em relação à costa.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	MENOR DISTÂNCIA EM RELAÇÃO À COSTA (KM)	MUNICÍPIO MAIS PRÓXIMO
DET_DIST_BAR_M_346_8_VER	09/05/2014 13:00hs	47,6	Araioses (MA)
DET_DIST_BAR_M_346_8_INV	18/11/2014 02:00hs	60,1	Água Doce do Maranhão (MA)
DET_DIST_BAR_M_346_200_VER	19/02/2014 01:00hs	23,6	Água Doce do Maranhão (MA)
DET_DIST_BAR_M_346_200_INV	10/11/2014 14:00hs	57,4	Araioses (MA)

Na Tabela 15 é apresentada a área de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística de menor distância. Observa-se que os volumes de 200 m³ apresentaram áreas superiores aos cenários de 8 m³ para ambos os períodos simulados. Durante o verão observou-se uma área de 125,5 km² (8 m³) e 1.004,0 km² (200 m³), enquanto no período de inverno observou-se áreas de 122 km² (8 m³) e 369,5 km² (200 m³).

**Tabela 15** - Áreas de deslocamento do óleo ao longo de toda a simulação determinística.

CENÁRIOS	ÁREA DE DESLOCAMENTO DO ÓLEO AO LONGO DE TODA A SIMULAÇÃO (Km ²)
DET_DIST_BAR_M_346_8_VER	125,5
DET_DIST_BAR_M_346_8_INV	122,0
DET_DIST_BAR_M_346_200_VER	1.004,0
DET_DIST_BAR_M_346_200_INV	369,5

Da Figura 54 a Figura 59 (8 m³) e da Figura 60 a Figura 66 (200 m³) são apresentados os resultados determinísticos críticos de menor distância do óleo em relação à costa. Analisando os gráficos de balanço de massa destas simulações, pode-se visualizar que, ao final da simulação, o óleo encontrou-se quase todo evaporado ou na coluna d'água.

Estes dois processos foram responsáveis por, aproximadamente, 90% do intemperismo do óleo. A biodegradação neste caso foi menor devido ao fato do derrame ocorrer na superfície.

Observou-se, também, que para ambos os volumes, a % de óleo na superfície da água ao final da simulação foi maior no período de verão quando comparado ao período de inverno.

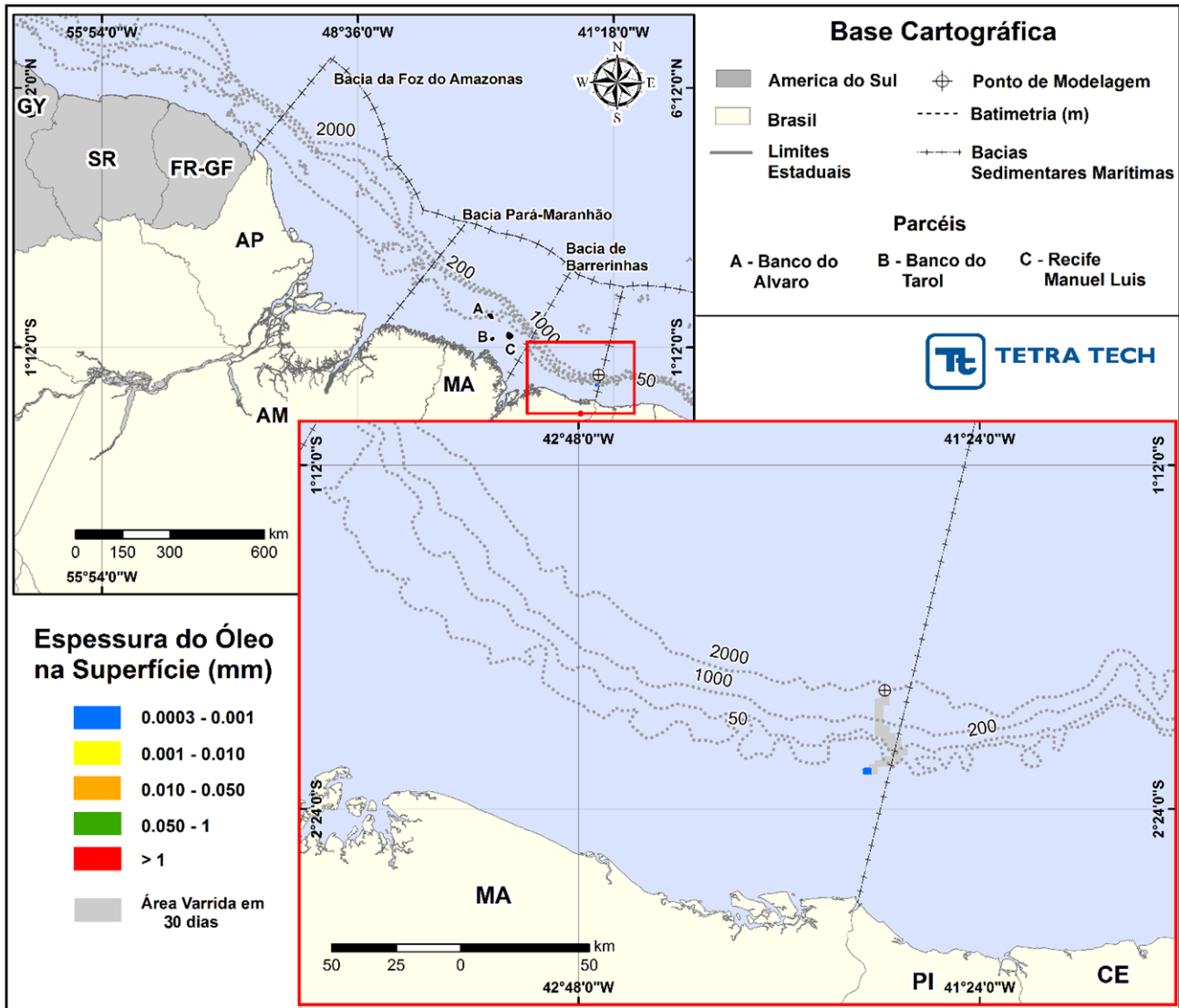


Figura 54 - DET_DIST_BAR_M_346_8_VER: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 8 m³ (Instantâneo).

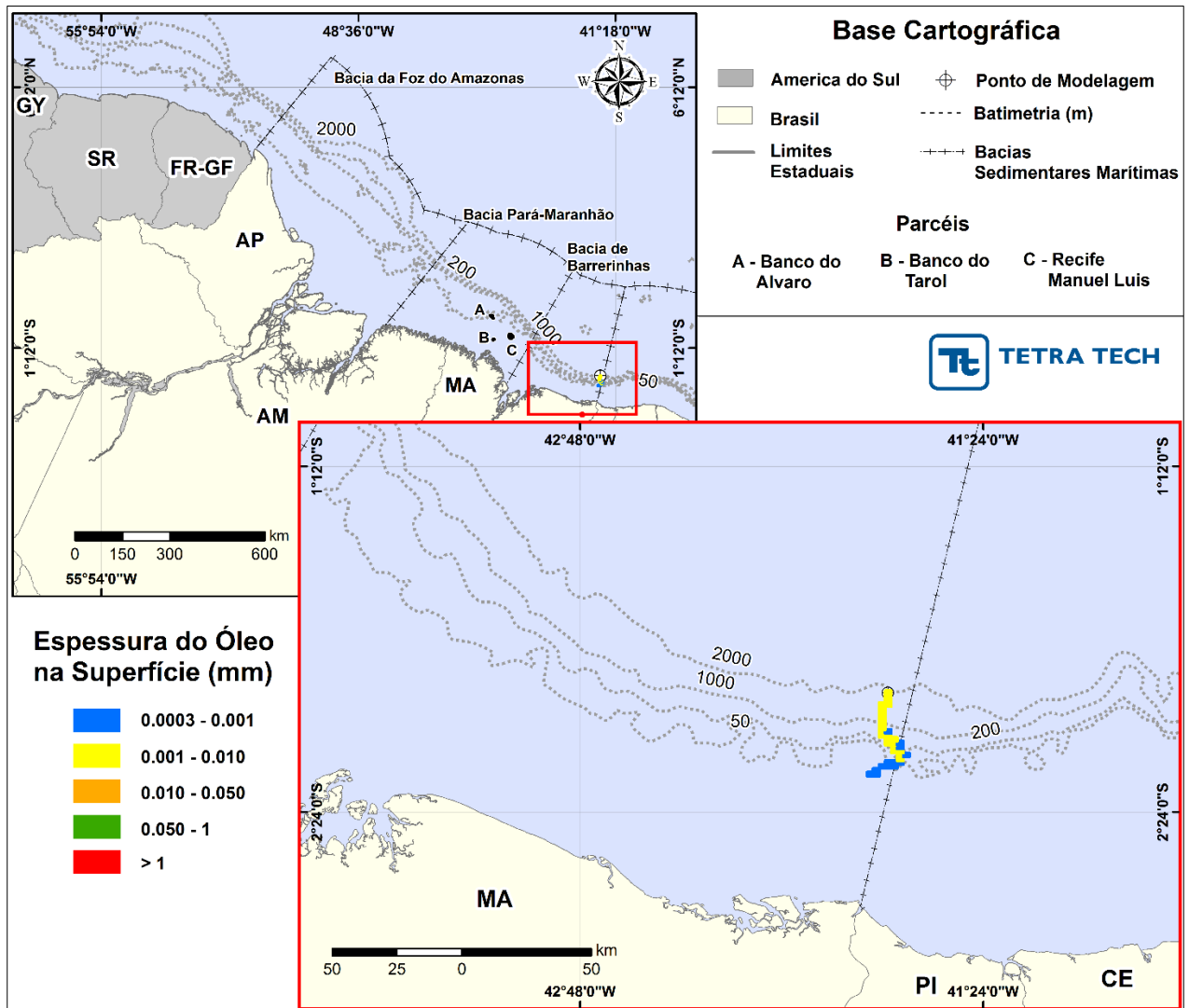


Figura 55 - DET_DIST_BAR_M_346_8_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 8 m³ (Instantâneo).

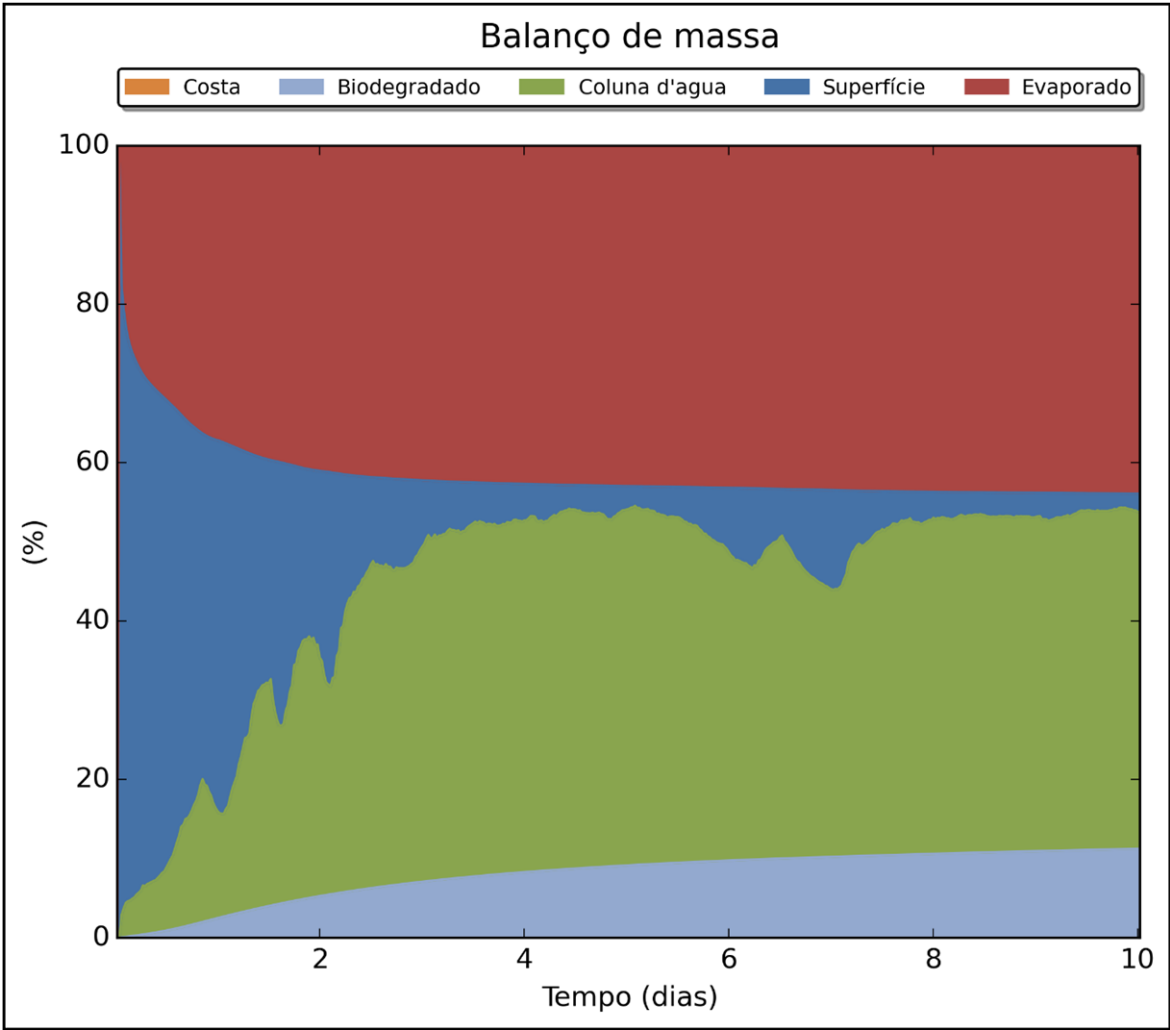


Figura 56 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_8_VER.

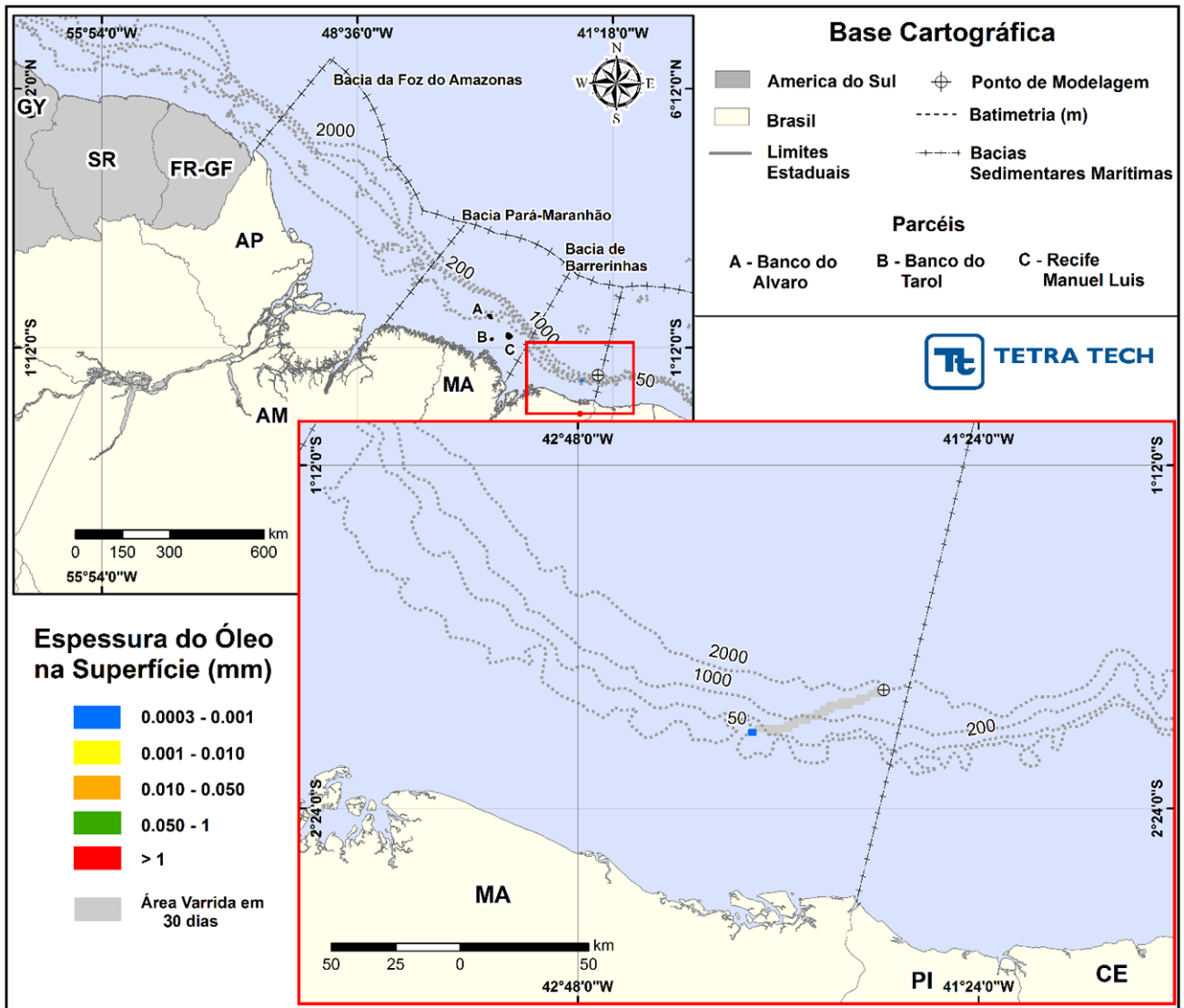


Figura 57 - DET_DIST_BAR_M_346_8_INV: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 8 m³ (instantâneo).

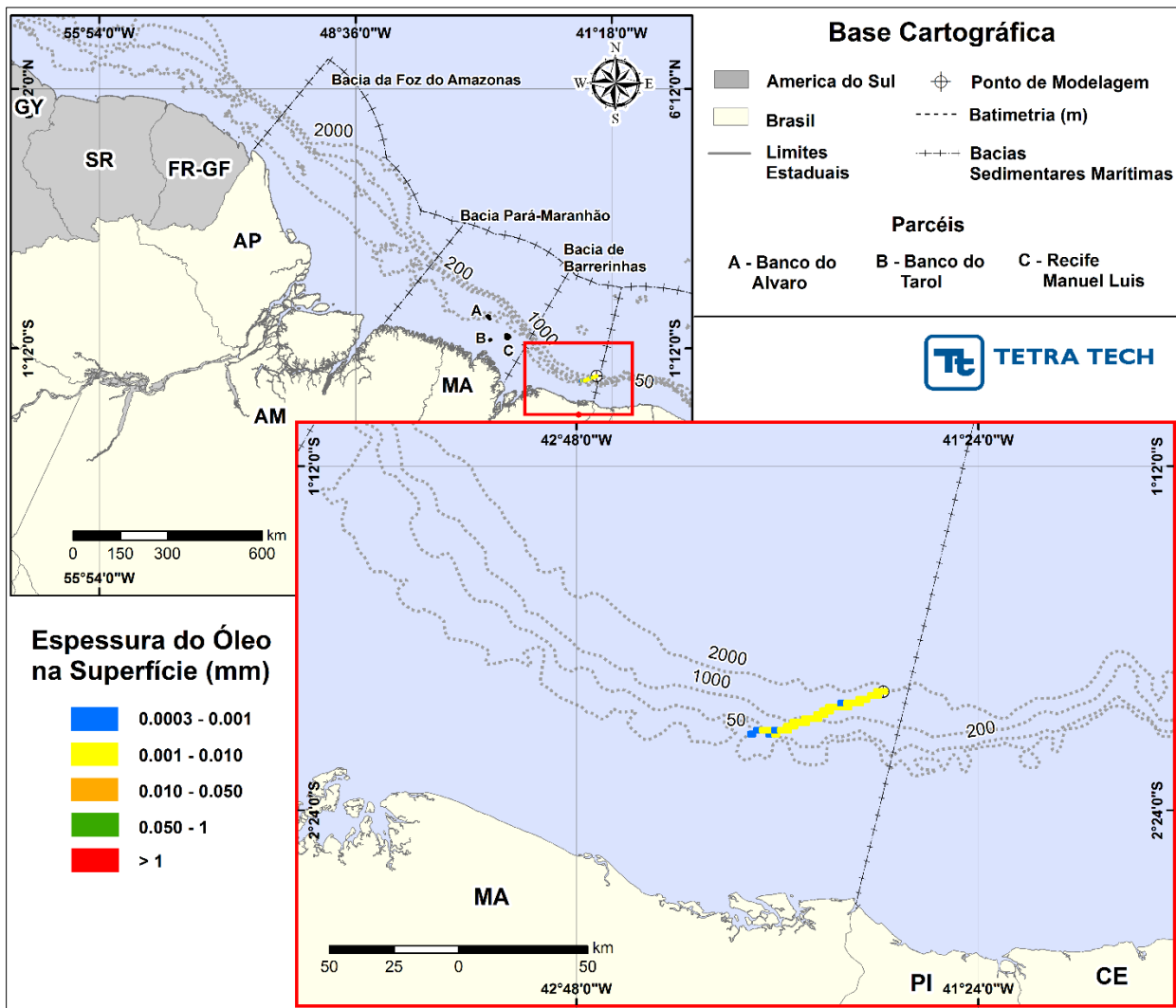


Figura 58 - DET_DIST_BAR_M_346_8_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrendo no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 8 m³ (Instantâneo).

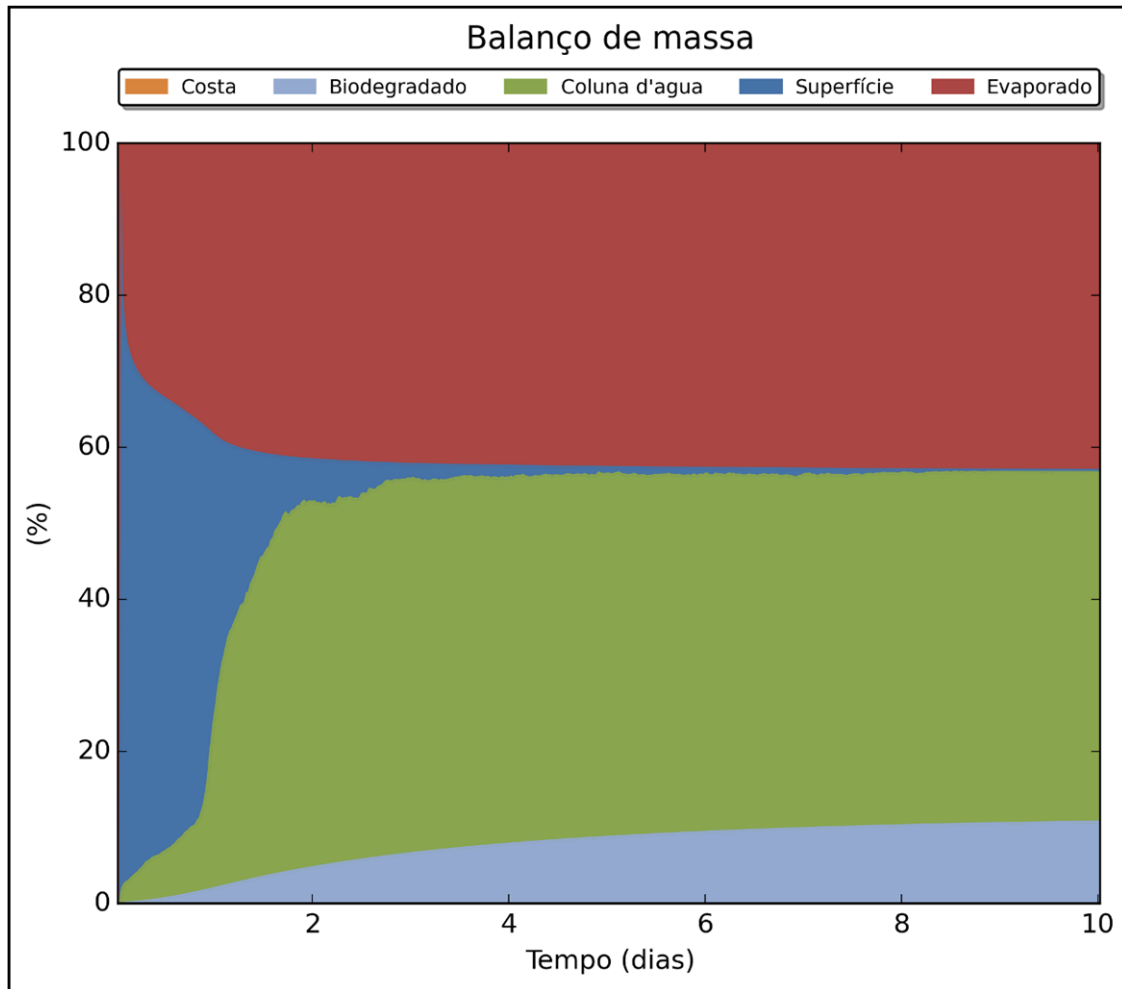


Figura 59 - Balanço massa para o cenário *DET_DIST_BAR_M_346_8_INV*.

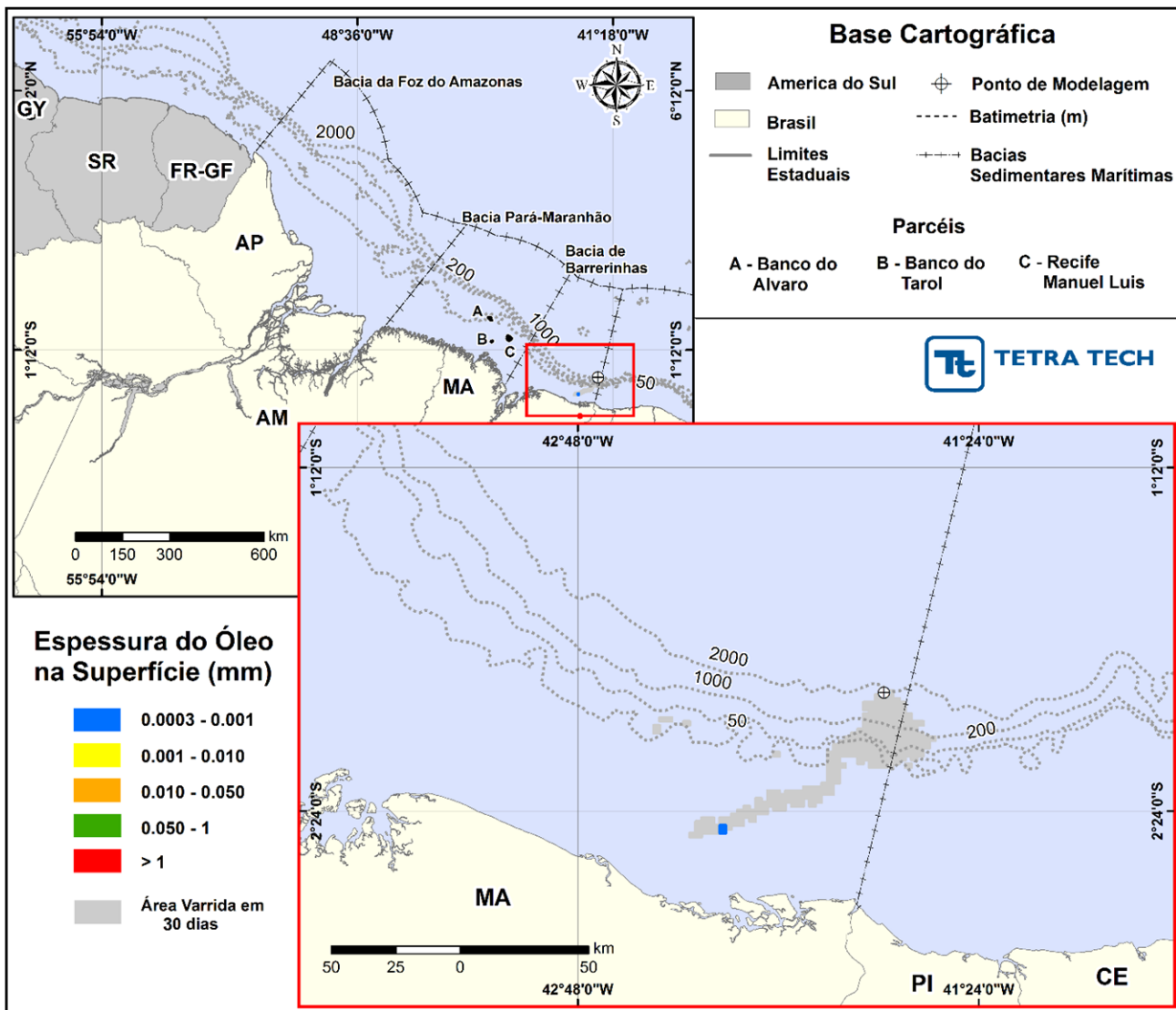


Figura 60 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m³ (Instantâneo).

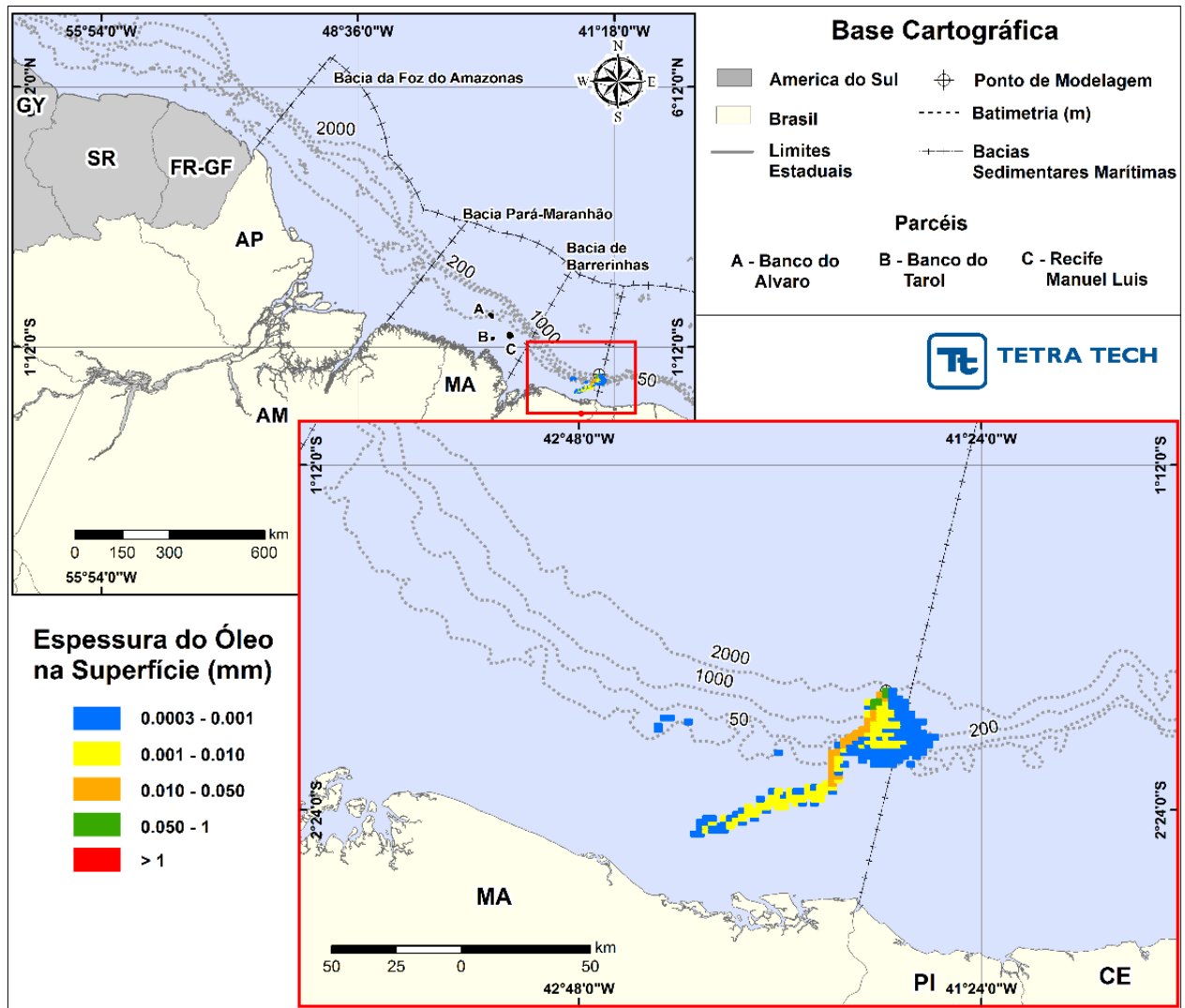


Figura 61 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco-BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 200 m³ (Instantâneo).

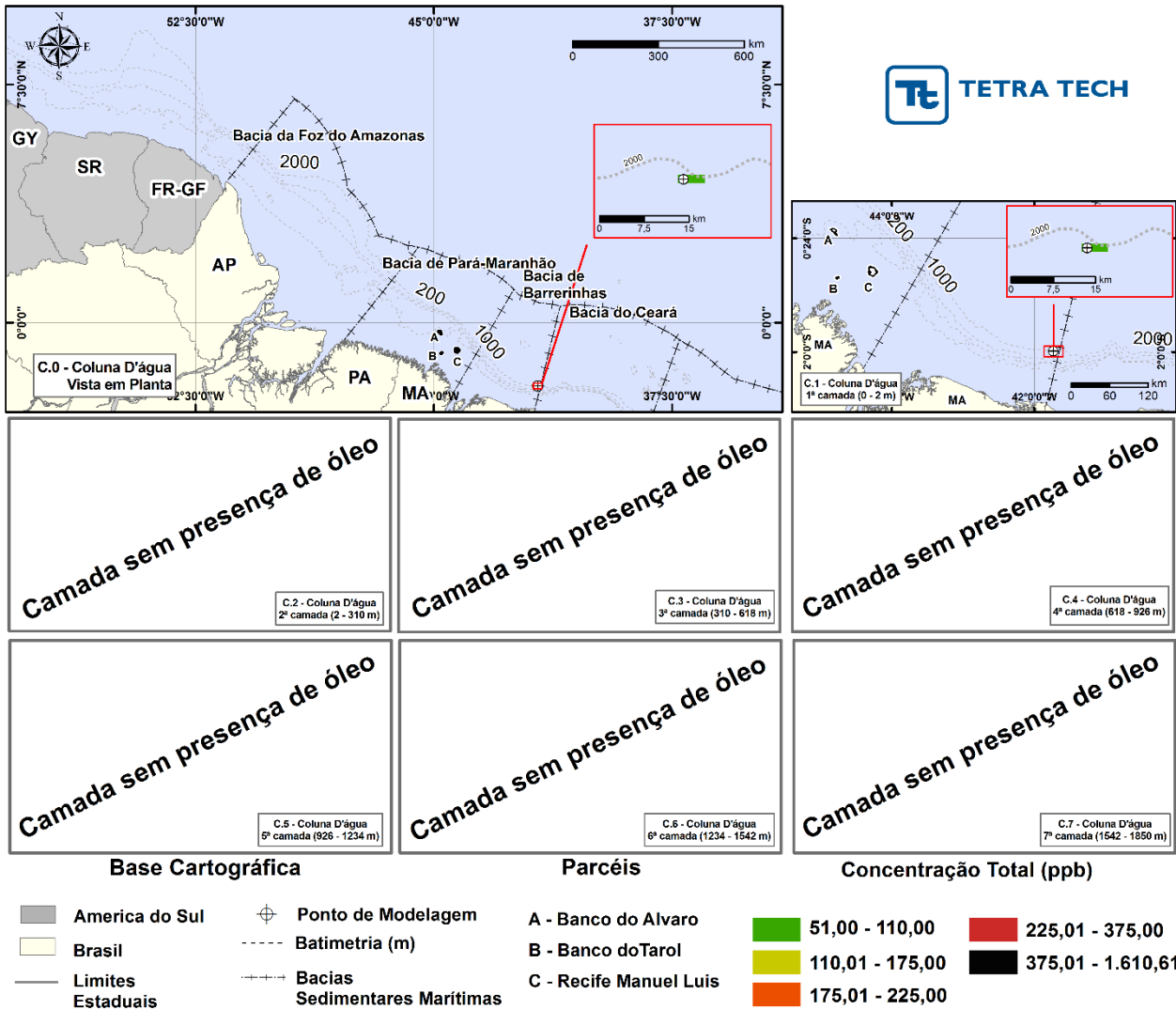


Figura 62 - DET_DIST_BAR_M_346_200_VER. Concentração máxima do óleo na coluna d'água, do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um cenário ocorrido no bloco BAR-M-346, durante o período de verão, com volume de 200 m³ (Instantâneo).

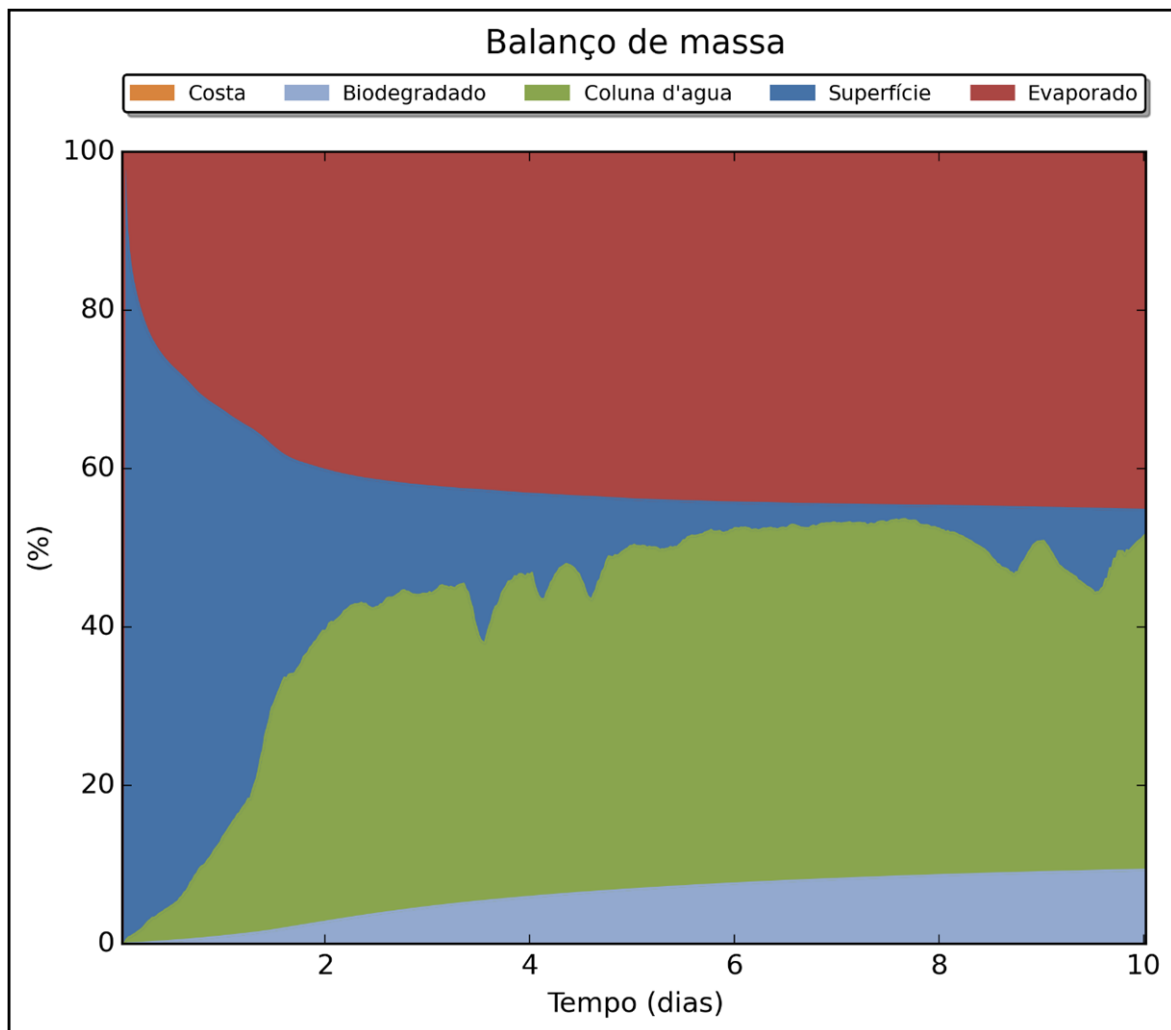


Figura 63 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_200_VER.

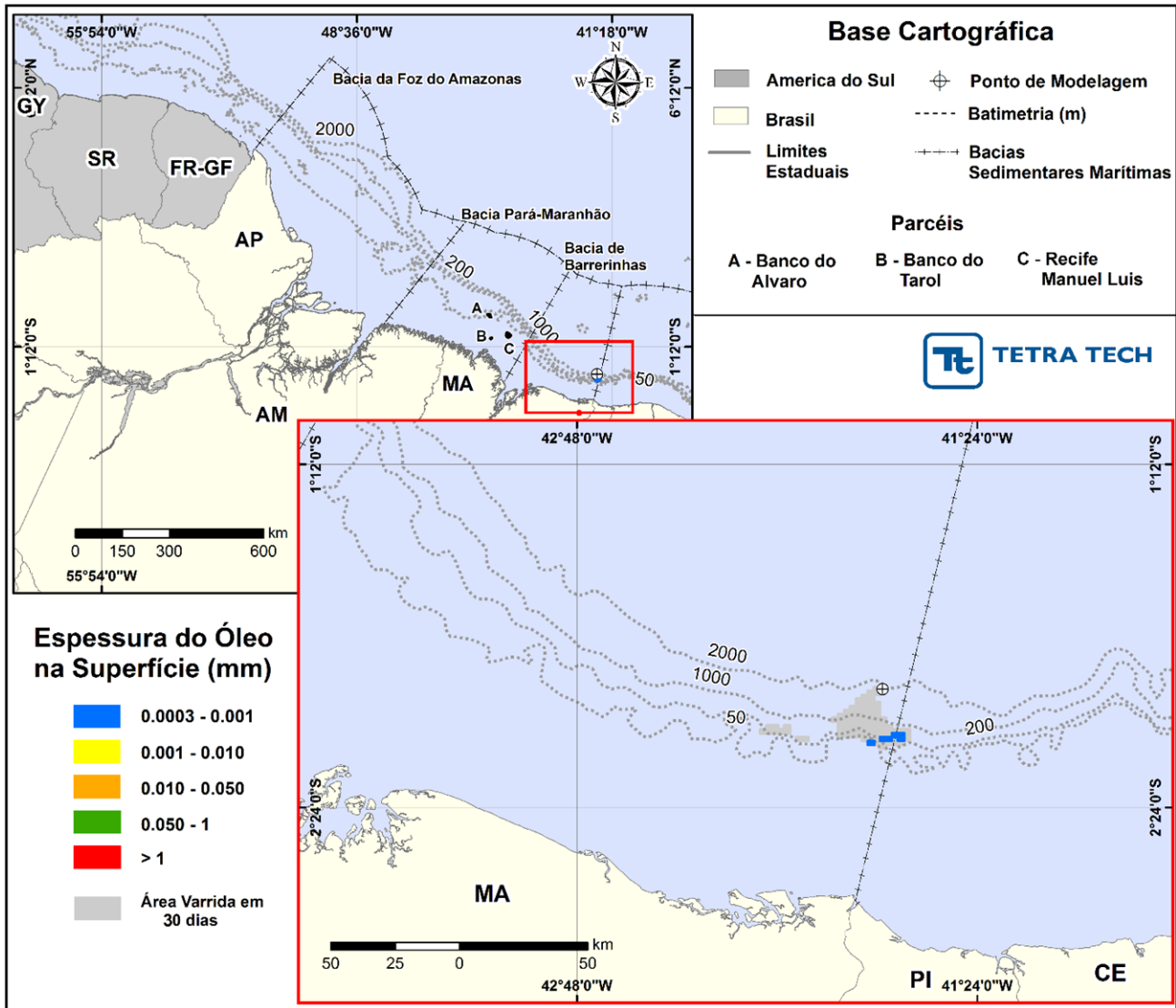


Figura 64 - DET_DIST_BAR_M_346_200_INV: Cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m³ (instantâneo).

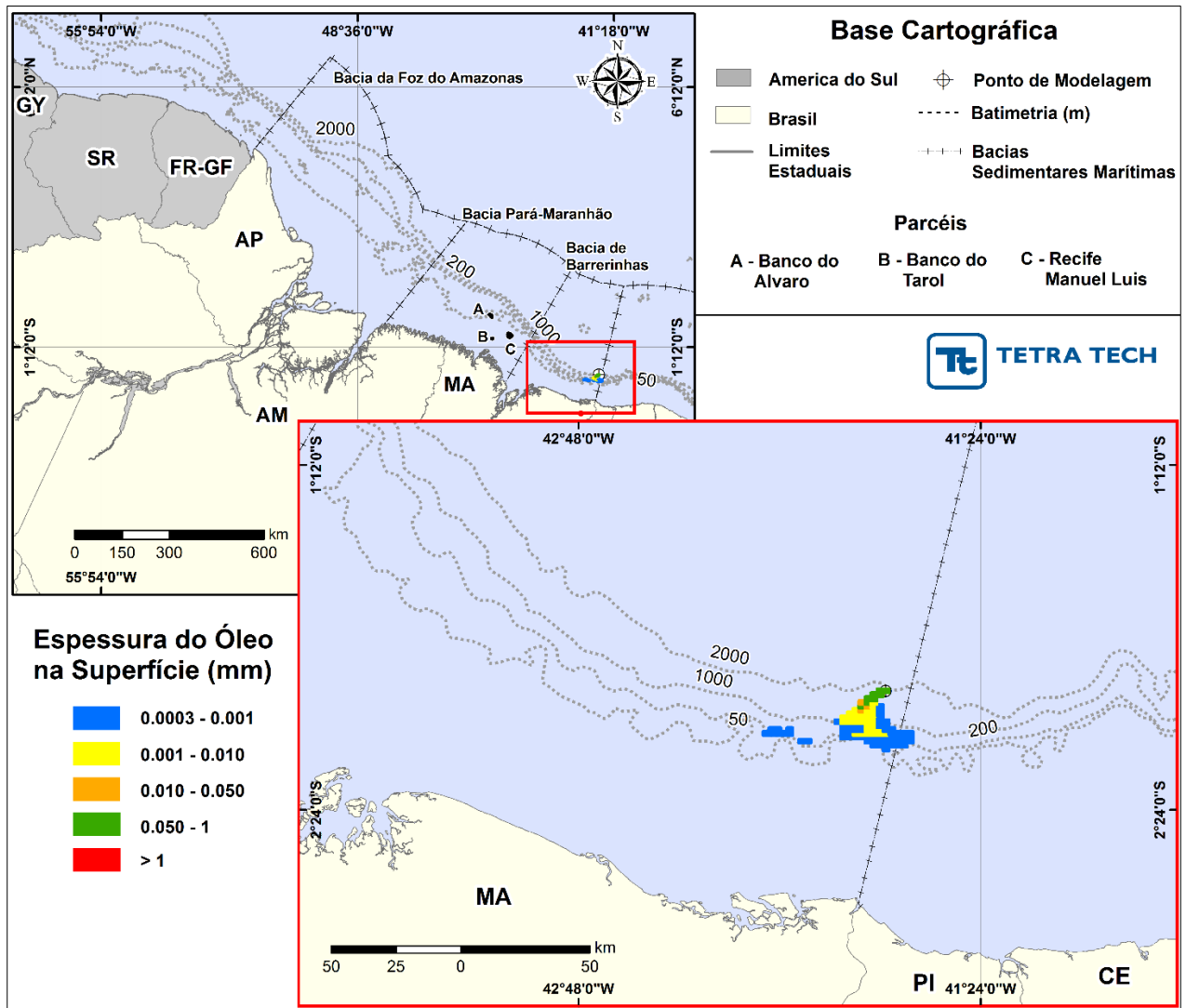


Figura 65 - DET_DIST_BAR_M_346_200_INV. Espessura máxima do óleo na superfície da água (área de dispersão), do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, para um acidente ocorrido no Bloco-BAR-M-346, durante o período de inverno, com volume de 200 m³ (Instantâneo).

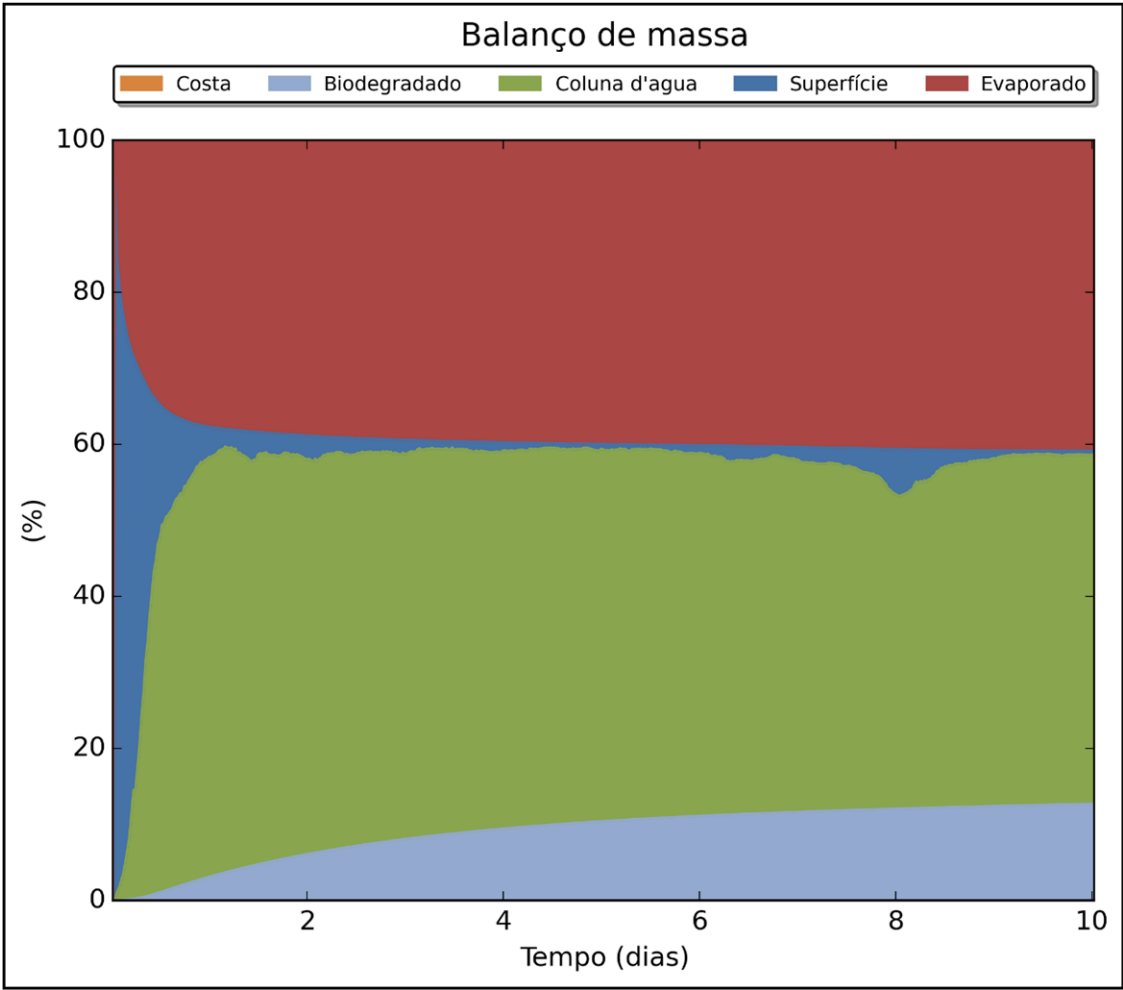


Figura 66 - Balanço massa para o cenário DET_DIST_BAR_M_346_200_INV.

3.2.3.1. Condições Meteorológicas e Oceanográficas - Simulações Determinísticas de Menor Tempo

A seguir, são apresentadas as figuras das condições meteorológicas e oceanográficas que atuam nos cenários determinísticos críticos que propiciaram a menor distância do óleo em relação à costa, para ambos os períodos simulados.

Da Figura 67 até a Figura 69 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, com volume de 200 m³, no período de verão. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante em que a mancha na superfície encontra-se mais próxima ao Município de Água Doce do Maranhão – MA (23,6 km).

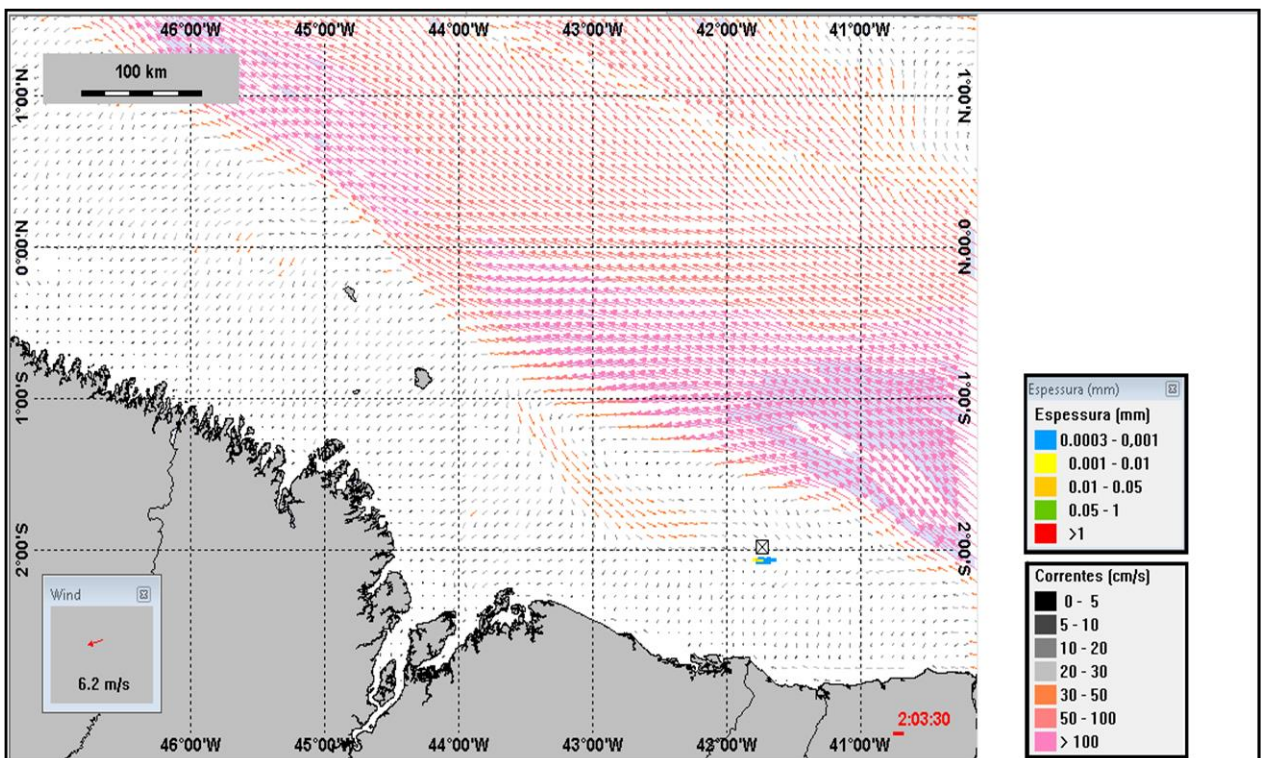


Figura 67 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-NE.

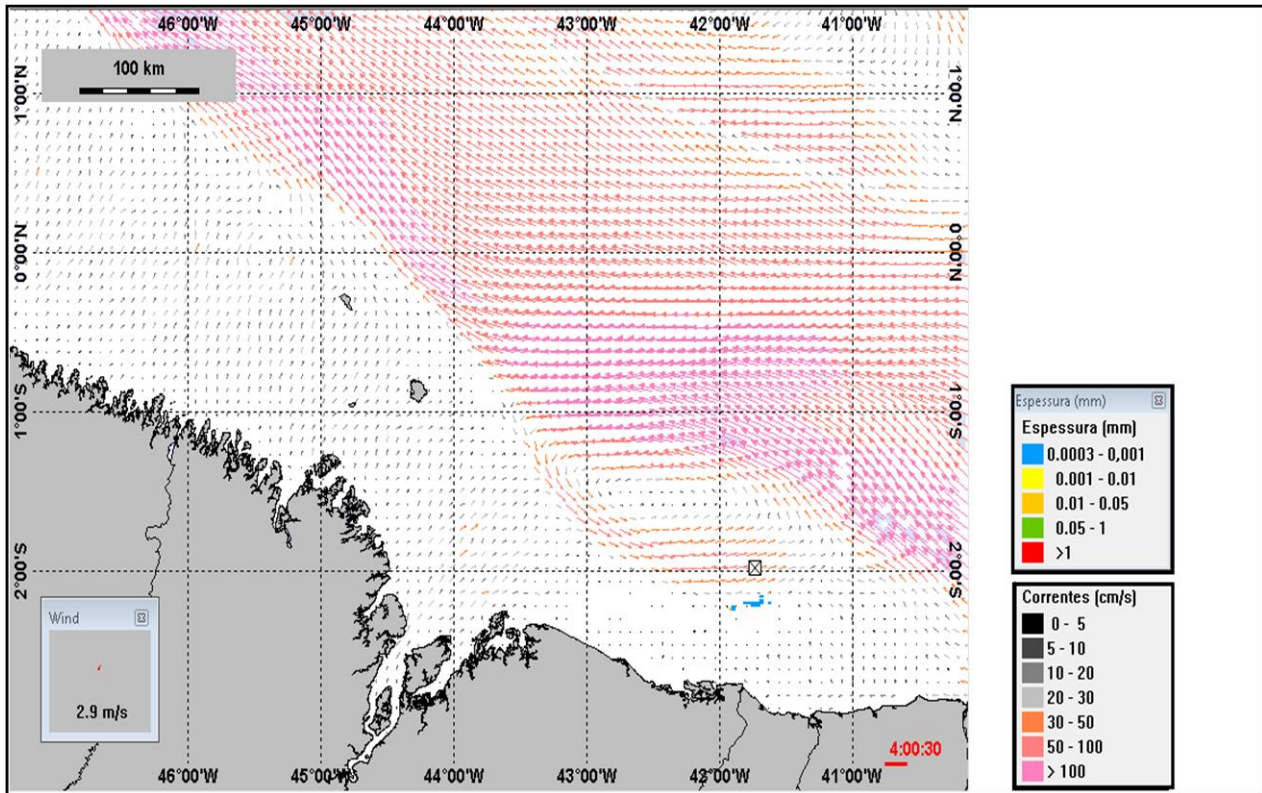


Figura 68 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

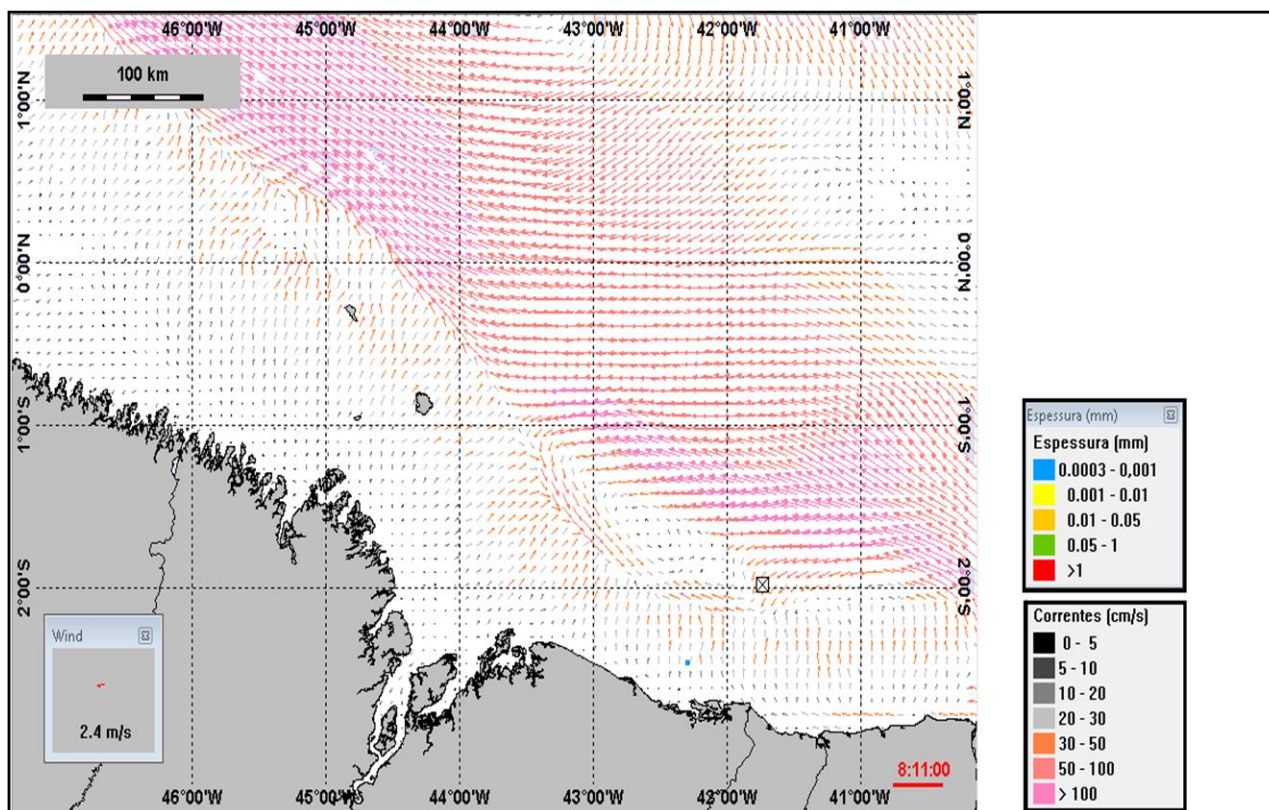


Figura 69 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de verão. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

Da Figura 70 até a Figura 72 são apresentadas ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de menor distância do óleo em relação à costa, com volume de 200 m³, no período de inverno. Nestas figuras a mancha é apresentada a partir do início do derrame até o instante em que a mancha na superfície encontra-se mais próxima ao Município de Araisos – MA (57,4 km).

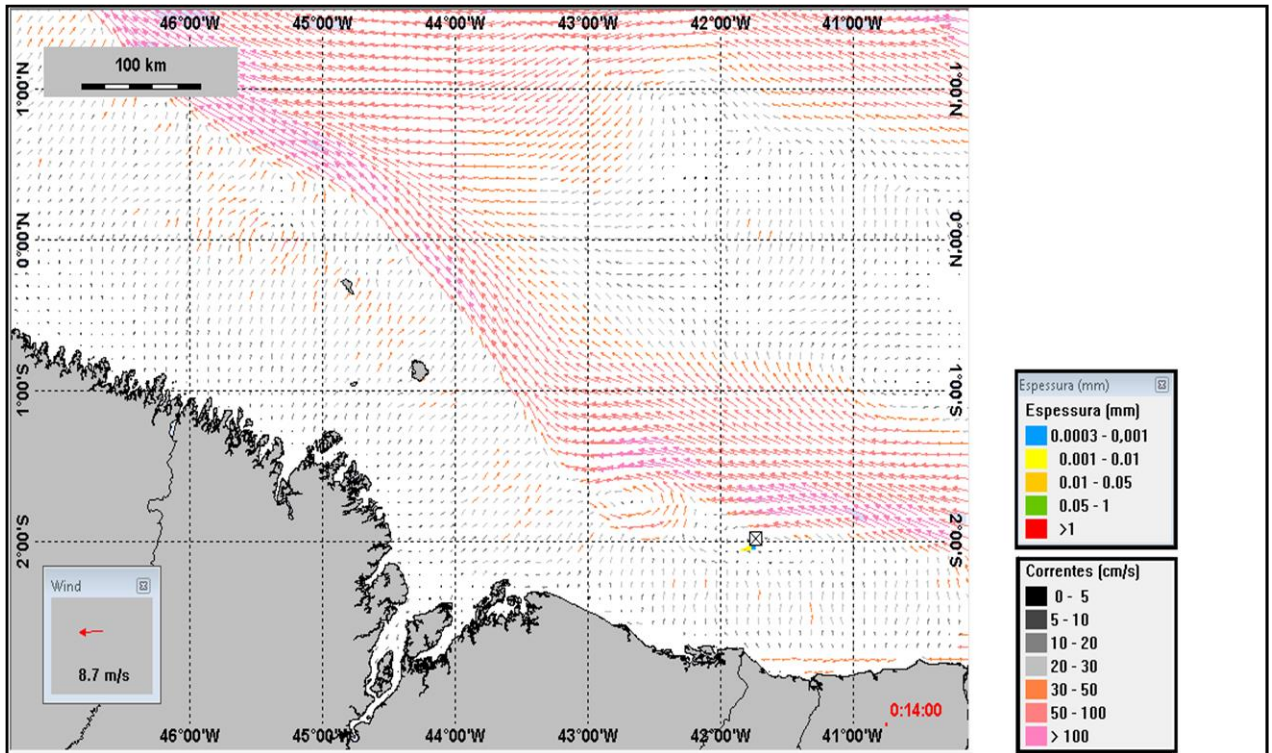


Figura 70 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-W; Vento-E.

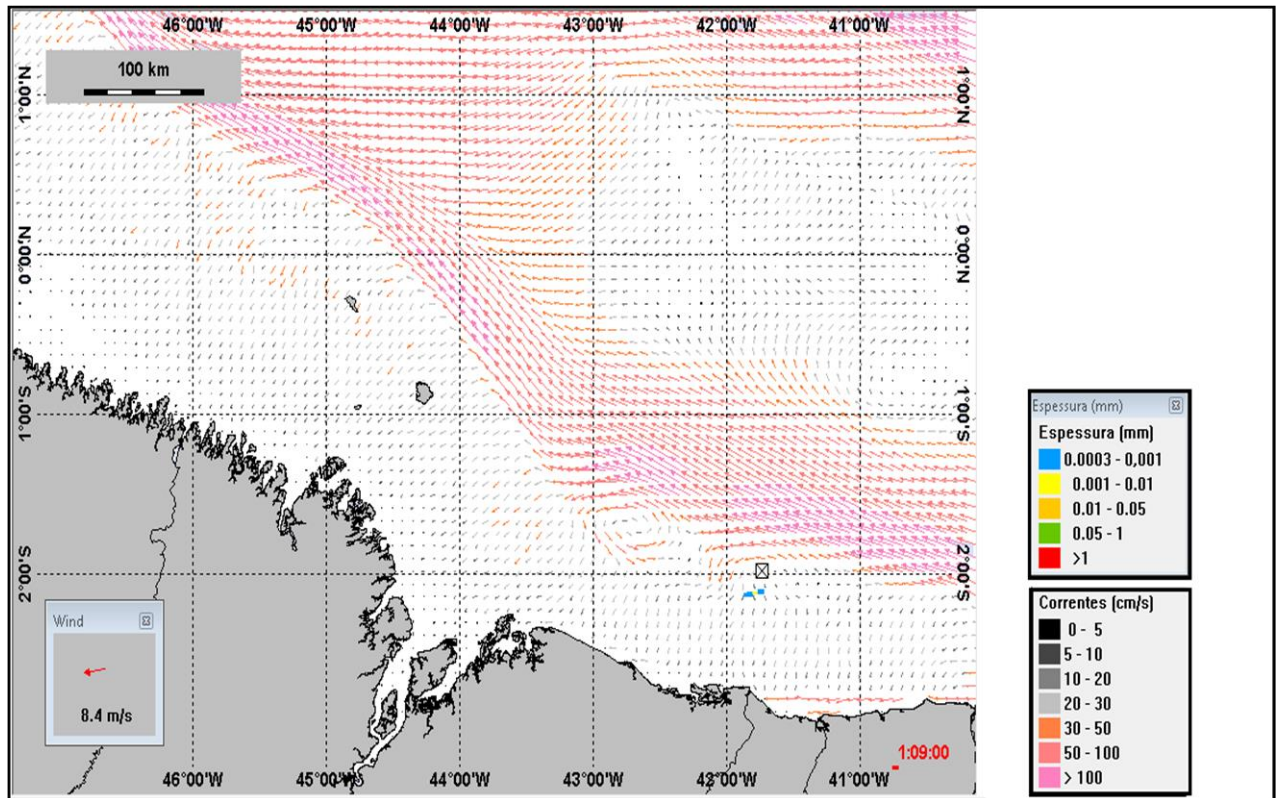


Figura 71 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo em um instante intermediário da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-NW; Vento-E.

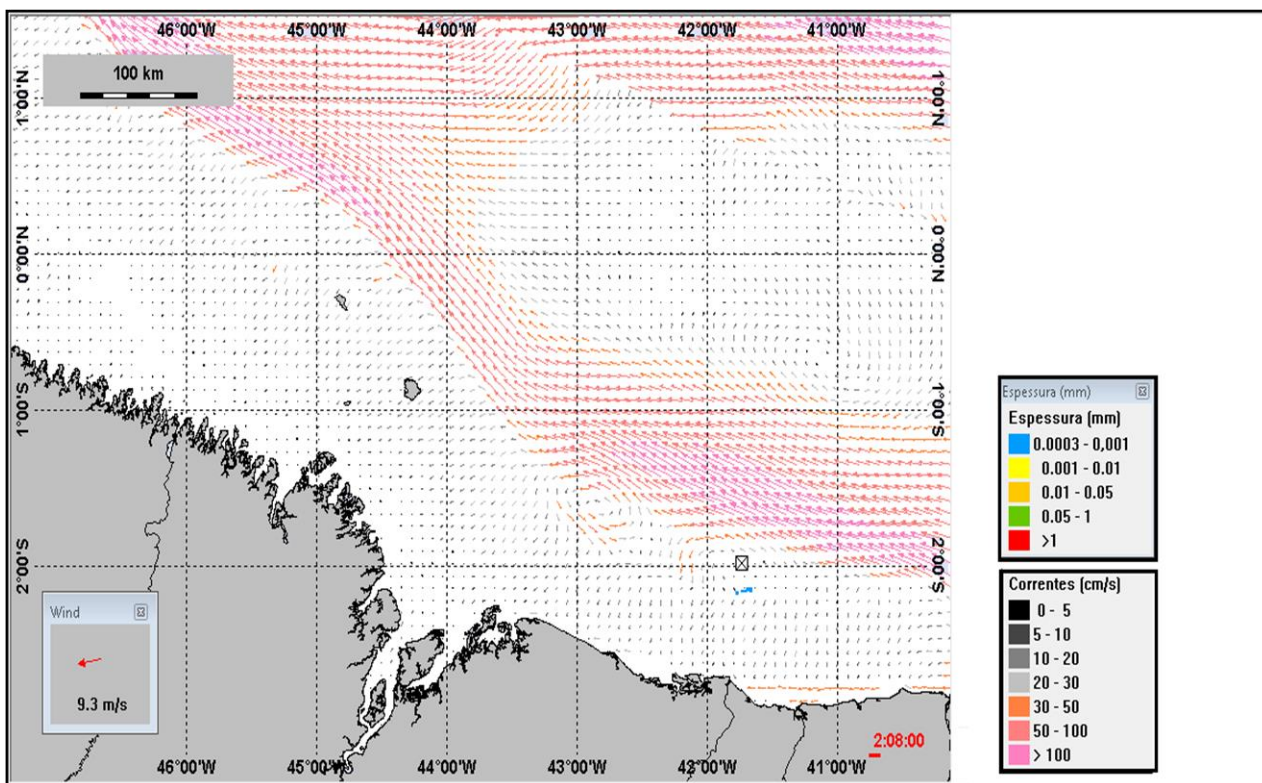


Figura 72 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante do primeiro toque da simulação determinística crítica de menor tempo, volume de 200 m³, no período de inverno. O vetor de vento apresentado é referente ao ponto de modelagem. Direção Predominante: Corrente-N; Vento-E.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório são apresentados os estudos realizados para a determinação da trajetória e intemperismo de óleo decorrente de potenciais cenários acidentais com derrame de óleo cru na Bacia de Barreirinhas, localizada na Região Nordeste Brasileira, para o vértice do Bloco Exploratório BAR-M-346.

Foram simulados cenários probabilísticos e determinísticos de derrames de óleo, considerando: 1) três volumes de derrame: pequeno (8,0 m³), médio (200,0 m³) e pior caso (50.720,1m³), calculados de acordo com a Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008); 2) dois períodos de seis meses (janeiro a junho e julho a dezembro), contemplando um ano de base hidrodinâmica, sendo representativos do verão {e outono} e inverno {e primavera}; e 3) características previstas para o óleo esperado no bloco.

O sistema de modelos OSCAR foi utilizado para definir áreas potencialmente ameaçada por cenários de derramamentos de óleo. O campo de correntes característico dos padrões de circulação na região foi obtido a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D. O campo de ventos foi proveniente de dados de reanálise de modelo meteorológico CFSR, implementado pela TETRA TECH.

O critério de parada utilizado nas simulações foi o tempo de 30 dias após o final do vazamento. Dessa forma, para as simulações de derrame pequeno e médio (derrames em regime instantâneo) a duração foi de 30 dias; e para as simulações de pior caso (*blowout* gerando um derrame contínuo ao longo de 30 dias) foi de 60 dias. A partir dos resultados das simulações probabilísticas, foram selecionados os cenários determinísticos críticos, para cada cenário probabilístico, utilizando como critérios o menor tempo de toque e maior quantidade de massa de óleo na costa. Quando não houve probabilidade de toque, considerou-se como cenário crítico aquele que apresentou a menor distância de uma mancha em relação à linha de costa.

Adicionalmente, adotou-se a espessura mínima de 0,0003 mm na apresentação dos resultados para a superfície da água e concentração mínima de 51 ppb para os resultados na coluna d'água. Os cenários com volumes pequeno e médio foram conduzidos considerando o vazamento a partir da superfície, enquanto os cenários com volume de pior caso foram simulados a partir do fundo (*blowout* de fundo).

Vale ressaltar que todas as análises de interação com a linha de costa dos municípios foram elaboradas com base nos resultados de óleo na costa e/ou superfície da água. Não foi feita análise de interação dos resultados de óleo na coluna d'água, uma vez que o modelo não fornece estes resultados. Além disso, não existe uma separação do óleo que se encontra particulado do óleo que está dissolvido na coluna d'água.

Os resultados da modelagem mostraram que existe probabilidade de toque na costa apenas para os cenários de pior caso, para ambos os períodos simulados. Durante o período de verão, as maiores probabilidades de toque na costa ocorreram no Município de Barreirinhas (MA) (80%), enquanto no período de inverno as maiores probabilidades de toque de óleo na costa são de 10% nos Municípios de São Luís e Santo Amaro do Maranhão (MA). Apesar de um padrão hidrodinâmico muito parecido ao longo de todo período de simulação, os ventos de quadrante E-NE, mais intensos no período de verão, e as correntes no sentido SW podem ter contribuído com essas maiores probabilidades de óleo na costa durante o primeiro semestre.

A maior extensão de costa com probabilidade de ser atingida pelo óleo ocorreu durante o período de inverno (1.120,86 km) e o menor tempo de toque na costa (171 horas – Santo Amaro do Maranhão - MA) foi identificado de verão.

Para os cenários com volumes de 8 m³ e 200 m³, nenhum dos períodos simulados apresentou toque de óleo na costa ou em qualquer Unidade de Conservação.

O Parcel Manuel Luís e os Bancos do Álvaro e Tarol foram considerados para análises por seus limites como Unidades de Conservação. Assim, para ambas condições sazonais, o Parcel de Manuel Luís apresentou o menor tempo de toque, sendo de 284 horas para o período de verão e 277 horas para o período de inverno.

Os resultados das simulações dos cenários determinísticos de menor tempo e maior massa na costa mostraram que a biodegradação e perda de massa para a coluna d'água foram os processos intempéricos mais importantes na dispersão do óleo para os cenários de pior caso. Além disso, processos intempéricos como a dissolução e a dispersão natural, regidos pela ação de ventos, correntes e marés na coluna d'água, também foram fatores importantes na redução da massa de óleo na superfície da água ao final de cada período simulado, com aproximadamente 45% do processo de intemperismo durante os meses de verão (4.222,5m³).



Os cenários de 8 m³ e 200 m³ não apresentaram probabilidade de toque de óleo na costa quando submetidos aos critérios de corte.

Finalmente, nas simulações apresentadas neste estudo, não foram consideradas quaisquer medidas de resposta ou controle, provenientes de Planos de Contingência e Planos de Emergência, para os potenciais acidentes simulados.

5. BIBLIOGRAFIA

BLECK, R. 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, v. 4, n. 1, p. 55-88.

BLECK, R.; BOUDRA, D., 1981. Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate. *Journal of Physical Oceanography*, v. 11, n. 6, p. 755-770.

BRASIL, 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 18 março. 2005.

BRASIL, 2008. Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 12 jun. 2008.

HALLIWELL, G., 2004. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the hybrid-coordinate ocean model (HYCOM). *Ocean Modelling, Elsevier*, v. 7, n. 3-4, p. 285-322.

SAHA S. et al., 2010. The NCEP Climate Forecast System reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, p. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.



6. EQUIPE TÉCNICA

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa
Registro no Conselho de Classe	1.689 (AOCEANO)
CPF	216.695.528-29
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Bruno António Duarte Passa
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	844.997.370-87
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Carolina Yumi Yonamine
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Gestora Ambiental
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5680369
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Engenheiro Mecânico
Registro no Conselho de Classe	060.184.738.5 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Físico
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	188.764.658-20
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Glauco Matheus Lopes
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	320.456.728-16
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	5069291950 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Item 2.2 e Anexos C e E
Assinatura	_____

Profissional	Pedro Fabiano de Moraes Sarmiento
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	303.524.648-36
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____



Profissional	Ricardo Ozella Busoli
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	184.317.508-80
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____



ANEXO A – DESCRIÇÃO DO MODELO OSCAR

O modelo OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*) foi desenvolvido pela SINTEF (<http://www.sintef.no>) com a finalidade de dar suporte a Planos de Contingência e respaldo a tomada de decisões em casos de derrames de petróleo. As aplicações do OSCAR incluem:

- Estabelecimento de objetivos e critérios quantitativos para fins de regulação e gestão,
- Planos de contingência e treinamentos a derrames de óleo,
- Suporte a ações de resposta a derrames de óleo,
- Avaliação de alternativas de estratégias e logísticas de resposta a derrames de óleo,
- Risco Ambiental e avaliação de Impacto Ambiental,
- Avaliação Ambiental para o uso de dispersantes,
- Análise de custo-benefício e otimização para a compra e disposição de equipamentos,
- Avaliar alternativas de estratégias de resposta procurando aquela que trará menores impactos no ambiente (*Net Environmental Benefit Analysis - NEBA*).

Estas aplicações foram desenvolvidas para atendimento das necessidades da indústria do petróleo, com aplicações já em curso para instalações *offshore*, transporte petroleiro internacional, terminais e refinarias costeiras.

A.1 PREMISAS

Os componentes principais do sistema são: um modelo de intemperismo do óleo da SINTEF (AAMO *et al.*, 1993; DALING *et al.*, 1990), um modelo tridimensional do intemperismo químico e trajetória do óleo (REED *et al.*, 1995) um modelo de combate ao derramamento de óleo (AAMO *et al.*, 1995, 1996), e modelos de exposição a peixes, ictioplâncton, pássaros e mamíferos marinhos (DOWNING & REED, 1996).

O modelo de intemperismo do óleo e o modelo tridimensional de destino químico consideram o seu fracionamento e calculam a distribuição do poluente na superfície da

água, ao longo da linha de costa, na coluna d'água e nos sedimentos¹⁴. São empregados algoritmos de advecção, espalhamento, emulsificação, volatilização, dispersão, dissolução, adsorção e entranhamento.

O modelo de combate ao derramamento de óleo permite a simulação de cenários probabilísticos e determinísticos com uso de barreiras de contenção, recolhedores de óleo e dispersante químico. Existe, também, um modelo biológico de exposição a peixes, ictioplâncton, pássaros e mamíferos marinhos que mensura o impacto sobre cada grupo de organismos de acordo com a intensidade do derramamento¹⁵.

Com a finalidade de representar bem o óleo e seus produtos de degradação, o OSCAR combina um grande número de componentes individuais do óleo, pseudocomponentes e metabólitos. Este tipo de abordagem permite que as taxas dos processos de intemperismo sejam calculadas para cada componente, já que, por exemplo, diferentes componentes apresentarão taxas de evaporação ou degradação diferenciadas.

Com relação às previsões de intemperismo empregadas no OSCAR, diversos testes em campo foram realizados para verificar sua confiabilidade, evitando-se resultados irreais (DALING & BRANDVIK, 2001).

O OSCAR já foi aplicado na análise de estratégias de resposta tanto para plataformas de petróleo *offshore* (AAMO *et al.*, 1995; REED *et al.*, 1995) quanto para terminais costeiros (REED *et al.*, 1996). O modelo utiliza partículas lagrangeanas e "pseudo lagrangeanas" para determinar o transporte, o comportamento e os efeitos dos poluentes através de cálculos de sua distribuição temporal na superfície da água, na coluna d'água, nos sedimentos e ao longo da costa.

O OSCAR emprega algoritmos de espalhamento superficial, advecção, entranhamento, emulsificação e evaporação para determinar o transporte e destino dos compostos. Os contaminantes no fundo são misturados no sedimento, e podem voltar à fase dissolvida na coluna d'água, enquanto que os próximos à superfície podem evaporar para a atmosfera. Na coluna d'água os poluentes sofrem uma turbulência horizontal, relacionada à idade das partículas, e uma turbulência vertical, que é função da

¹⁴ Na modelagem em questão não foi estimada a interação do óleo com sedimentos, uma vez que não há dados medidos de material em suspensão para toda a área de influência. Além disso, como o modelo utiliza apenas um valor, sem variação espacial, não seria representativo de toda a área de influência, que engloba a região costeira de vários municípios no litoral brasileiro.

¹⁵ Este módulo não foi considerado na modelagem em questão.



profundidade local e da velocidade dos ventos. Além disto, o particionamento entre o dissolvido e adsorvido ao material particulado é calculado com base na teoria de equilíbrio linear. Já a degradação na água e nos sedimentos é representada como um processo de decaimento de primeira ordem.

Para o óleo proveniente de derramamentos, processos como advecção, espalhamento, entranhamento e mistura vertical na coluna d'água não são diretamente dependentes da composição do óleo, embora exista uma tendência a estarem relacionados à macro características como viscosidade e densidade. Outros processos como evaporação, dissolução e degradação são diretamente dependentes da composição do óleo.

A interface de usuário do OSCAR permite a realização de cálculos estatísticos baseados nos resultados de conjuntos de cenários (simulações probabilísticas). Esta parte do sistema pode, por exemplo, ser utilizada para a avaliação de riscos relacionados com as instalações *offshore*. Ao variar o tempo de derrame para um cenário específico, o efeito da alteração das condições meteorológicas pode ser incluído nas simulações, e uma impressão geral do efeito de um derrame hipotético é obtido. Pode-se, também, optar pela variação da taxa de descarte e a duração deste durante a execução das simulações probabilísticas.

A.2 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DO MODELO

As limitações identificadas para o modelo estão listadas, abaixo:

- ✓ A grade do modelo apresenta limitação numérica de 1.000 células no eixo X e 1.000 células no eixo Y, distribuídas de forma regular. No caso de modelagens para vazamentos *offshore*, nas quais os domínios modelados são extensos, a resolução máxima pode ser insuficiente e ocasionar a diminuição da resolução de contornos costeiros; os tipos de costa também podem ter perda de informação;
- ✓ Apesar de permitir a discretização vertical das simulações probabilísticas em número de camadas superior a 7, para a maioria dos casos o modelo conduz às rodadas, no entanto, não são gravados os resultados quando se ultrapassa o limite de camadas suportada;
- ✓ Não é possível ajustar o fator de dispersão horizontal;

- ✓ Pode ser utilizado somente um valor de temperatura da água e do ar para realizar os cálculos do intemperismo do óleo ao longo de toda a simulação, ou seja, a temperatura não apresenta variação no tempo e no espaço;
- ✓ Não é possível visualizar, na coluna d'água, as parcelas de óleo particulado dissolvido separadamente;
- ✓ No modo probabilístico, não são considerados os processos de sedimentação do óleo;
- ✓ Coeficiente de arrasto de vento é fixo para todo o domínio espacial;
- ✓ Arquivos em inglês e que devem ser traduzidos;
- ✓ Nos cortes de espessura e massa na superfície da água e na linha de costa, os cálculos são realizados de forma segregada, e as unidades de medida são distintas, o que dificulta a comparação entre resultados;
- ✓ É possível adotar corte de espessuras para o óleo que está na superfície da água, no entanto, o modelo não exclui da linha de costa (probabilidade, massa) a chegada de óleo com espessuras abaixo do corte. Sendo assim, é necessário realizar um balizamento da extensão de toque na costa a partir dos resultados gerados, com corte, para a superfície da água.
- ✓ Em simulações determinísticas não é possível exportar a informação do eixo do tempo para todo o domínio da simulação;
- ✓ Ao se exportar os resultados na extensão *shape*, somente é possível a obtenção de uma informação por vez, ao passo um arquivo contendo diferentes informações tornaria mais ágil o processo de análise dos cenários e simulações;
- ✓ Apesar de permitir o máximo de 30.000 partículas, dependendo da versão, o modelo apresenta um erro chamado "crash" que derruba as rodadas quando da adoção de um número muito alto de partículas. O número mínimo de partículas recomendadas é de 50 a 1.000, dependendo da versão do modelo;
- ✓ Limitação do número de camadas em Z (quantidade bem menor no modo probabilístico em comparação ao modo determinístico);
- ✓ Apesar de permitir a discretização vertical das simulações probabilísticas em número de camadas superior a 7, o modelo conduz às rodadas, no entanto, não são gravados os resultados quando se ultrapassa o limite de camadas suportada;



- ✓ O campo de correntes deve ser exportado em grade regular, mesmo que tenha sido derivado de hidrodinâmico com grade curvilínea, para que o mesmo possa ser importado no OSCAR. Este processo é elaborado pelo usuário através de outros *softwares*, com metodologia própria;
- ✓ Apesar de mostrar o óleo presente na coluna d'água, o modelo não estima a interação do óleo com o assoalho oceânico ou com bancos de corais submersos.

A.3 FORMULAÇÃO DO MODELO OSCAR

A advecção é simulada a partir da superposição da velocidade média local e um componente randômico que representa a turbulência no meio ambiente. A velocidade média local, em geral, é a soma das componentes climatológicos, de maré, de vento e de onda (Stokes). O componente de turbulência é computado como:

$$w' = \sqrt{6K/\Delta t} \quad (1)$$

Onde,

K = coeficiente de dispersão estimado para direções verticais e horizontais.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser aproximado utilizando-se dados de difusão de traçadores, relatado por Okubo (1971, 1974) e revisto por Bowden (1983).

$$K_x = 0,0027 t^{1,34} \quad (2)$$

Onde,

Para K em cm²/s e tempo t em segundos. Kullenberg (1982) cita que o valor máximo dos dados é de 10⁶ cm/s, ou 100 m²/dia.

O coeficiente vertical de difusão turbulenta acima da pycnoclina está relacionado às condições das ondas segundo Ichiye (1967):

$$K_z = (0,028H^2)/T \exp(-2kz) \quad (3)$$

Onde,

H = altura de onda;

T = período de onda;

K = número da onda;

Z = profundidade

Abaixo da profundidade da pycnoclina, assume-se o valor de K_z é uma constante igual a $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ (KULLENBERG, 1984). Na ausência de um pycnoclina, a equação Ichiye é assumida para o domínio da superfície ao fundo.

O cálculo da velocidade vertical de gotículas de óleo ou de partículas que afundam é feito a partir da superposição da velocidade randômica turbulenta e da velocidade ascendente ou fixa. A velocidade vertical diferencial é computada a partir da média harmônica de dois extremos e o coeficiente de arraste é função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000).

$$w_{rise} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1}) \quad (4)$$

$$w_1 = (d^2 g^2)/18\nu, \text{ para o numero de Reynolds } <1000 \quad (5)$$

$$w_2 = \sqrt{3d|g'|}, \text{ para o numero de Reynolds } >1000 \quad (6)$$

Onde,

$$g' = g(\rho_w - \rho_0)/\rho_w \quad (7)$$

g= aceleração gravitacional (m/s^2);

ρ_w = densidade da água (kg/m^3);

ρ_0 = densidade da gotícula ou do material da partícula (kg/m^3);

ν = viscosidade cinemática da água ($1,8 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve a interação entre forças e processos como a gravidade, momento, e viscosidade. A equação unidimensional utilizada para representar o espalhamento transversal de um vazamento contínuo está apresentada na sequência.



$$\chi_{LE} = C_0 (g \Delta \rho / (\rho_w^2))^{1/4} * m^{1/2} / (\rho_w \mu_w)^{1/8} * t^{3/8} \quad (8)$$

Onde,

χ_{LE} = largura da seção principal da mancha (m)

g = aceleração gravitacional (m/s²);

$\Delta \rho$ = diferença de densidade entre água e óleo (kg/m³)

ρ_w = densidade da água (kg/m³);

μ_w = viscosidade da água (cP)

m = taxa de liberação da massa/corrente superficial (kg/m)

C_0 = constante de espalhamento.

Essa equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento, e leva em consideração apenas o espalhamento quiescente da porção mais espessa da mancha. O espalhamento turbulento rapidamente ultrapassa esse espalhamento quiescente em importância. O espalhamento turbulento ocorre como resultado de cisalhamentos horizontais e verticais no campo de velocidade em uma mancha de óleo, combinado com o entranhamento e ressuspensão das gotículas de óleo. Como esses processos também estão incluídos, o modelo é capaz de produzir manchas menos espessas com o passar do tempo.

No fenômeno da evaporação, a taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor de seus componentes individuais e suas frações em qualquer localização na superfície da mancha. A taxa de transferência de massa evaporativa é calculada de acordo com a prática de engenharia química:

$$dm_i/dt = K_e P_i A M_i F_i / RT \quad (9)$$

Onde,

m_i = massa associada com a i-ésimo componente de derramamento,

t = tempo (s);

K_e = coeficiente de transferência de massa evaporativa (m/s);

T = temperatura (°K)

P_i = pressão de vapor para o i-ésimo componente (atm)

A = área de superfície da mancha (m²)

M_i = componente de peso molecular i (grama/mol)

F_i = fração molar do componente i restante na mancha

R = constante do gás 8,206 x 10⁵ atm-m³/mol-°K

O coeficiente de transferência de massa é dependente do vento e é calculado da seguinte forma:

$$K_e = C_d U(t) \quad (10)$$

Onde,

C_d = coeficiente de arrasto da relação ar/mar

$U(t)$ = velocidade do vento (m/s)

O coeficiente de arrasto C_d depende da velocidade do vento:

$$C_d = (U^*/U(t))^2 \quad (11)$$

onde $U(t) > u_2$

O valor de U^* é:

$$CU(t), \text{ para } U(t) < u_1 \quad (12)$$

$$Cu_1 + (Du_2 + Cu_1) * (U(t) - u_1)/(u_2 - u_1), \text{ para } u_1 \leq U(t) \leq u_2 \quad (13)$$

$$DU(t), \text{ para } U(t) > u_2 \quad (14)$$

C , D , u_1 e u_2 são constantes (0,0323; 0,0474; 7 e 20 respectivamente)

Com relação à dispersão natural, o modelo utilizado para a previsão de entranhamento do óleo é dada pela formulação empírica:

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad (15)$$

Onde,

Q_{di} = taxa de entranhamento por unidade de área de superfície das gotículas de óleo com o range de diâmetro entre $d_i - \Delta d$ e $d_i + \Delta d$ (kg/m²s)

C^* = coeficiente de entranhamento derivado empiricamente,

D = enérgica de onda dissipada por unidade de área superficial (kg/s²)

S = fração da superfície do mar coberta pelo óleo;

F = fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo (1/s)

D_i = diâmetro médio das partículas na classe de tamanho i (m)

Δd = intervalo de diâmetro da partícula (m)



O coeficiente empírico C^* é uma função da viscosidade do óleo.

$$C^* = 4450v^{-0,4} \quad (16)$$

Onde,

v = viscosidade cinemática do óleo (m^2/s).

A energia dissipada da arrebentação da onda D é aproximada como:

$$D = 0,0034\rho_w g H_b^2 \quad (17)$$

Onde,

ρ_w = densidade da água (kg/m^3);

g = aceleração gravitacional (m/s^2);

H_b = altura da onda no momento da arrebentação (m)

A fração F da superfície do mar coberta pela arrebentação das ondas por unidade de tempo é aproximada por:

$$F = 3 * 10^6 U(t)^{3,5} \quad (18)$$

Onde,

$U(t)$ = velocidade do vento (m/s)

O tamanho das gotículas é dado por:

$$d_0 = C_0 v^{0,34} / \sqrt{e} \quad (19)$$

Onde,

v = viscosidade cinemática;

e = taxa de dissipação da energia (escolhido como $1000 J/m^3s$)

C_0 = aproximadamente 500 para o tamanho mínimo das partículas e 3400 para o tamanho máximo. As gotículas são divididas em intervalos de tamanho que vão do mínimo tamanho das partículas para o máximo.

Com relação à interação do óleo com o litoral, o processo é desenvolvida de uma maneira simplificada, a partir de um modelo complexo de derramamento de óleo na zona costeira desenvolvido por Reed (1989) e Reed & Gundlach (1989). Baseado nestes estudos estimaram as capacidades de retenção e as taxas de remoção. As capacidades de retenção refletem a declividade da costa e a permeabilidade, além de exposição ao vento e às ondas.

Quando a superfície na mancha encontra a costa, o volume máximo do óleo, V_{max} (m^3), que pode ser depositada é calculada como:

$$V_{max} = \delta_i L W_i \quad (21)$$

Onde,

δ_i = capacidade de retenção máxima para a costa tipo i (m);

W_i = largura de deposição para a costa de tipo i (m);

L = comprimento do segmento de costa (m);

O modelo usa a distância diagonal da célula como uma estimativa do L . Se o segmento de costa encontra-se com sua capacidade máxima de retenção, a mancha continua a ser transportada pelo vento e pela corrente.

A quantidade de óleo removida do segmento de costa i durante um intervalo de tempo Δt é:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t]) \quad (22)$$

Onde,

m_i = massa de óleo no segmento i no início do intervalo de tempo;

r_i = taxa de remoção apropriada para o tipo de costa.

A dissolução, assim como a evaporação, depende da fração molecular de cada componente na gotícula ou superfície da mancha. Adicionalmente a concentração no ambiente se torna importante:

$$dm_i/dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (23)$$



Onde,

K_d = coeficiente de dissolução da transferência de massa (m/s);

A = Área da superfície para uma gotícula ou uma superfície da mancha (m²);

F_i = fração molar do componente i remanescente da mancha ou da gotícula;

S_i = solubilidade do i -ésimo componente (g/m³; ppm),

C_i = concentração do ambiente para o i -ésimo componente (g/m³).

Para a superfície da mancha, o coeficiente de transferência de massa K_d é calculada como (THIBODEAUX, 1979):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad (24)$$

Para manchas, na superfície a correlação para o número de Sherwood usada é:

$$Sh_i = \textit{Sherwood Number} = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad (25)$$

Onde,

Re = número de Reynolds = $U_{rel} L / \nu_w$;

Sc_i = número de Schmidt ν_w / D_i

U_{rel} = velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s);

L = largura da mancha (m);

ν_w = viscosidade cinemática da água ~ $8,9 \times 10^{-7}$ m²/s a 25°C

D_i = difusividade molecular do componente i (m²/s)

Para as gotículas, a correlação de transferência de massa para esferas é utilizada para o número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31} \quad (26)$$

Para as gotículas, a velocidade relativa é a velocidade de ascensão (Equação 6) e o diâmetro da mancha substitui a largura da mancha como a característica de comprimento no cálculo do número de Reynolds.

A adsorção, por sua vez, tem um papel importante no transporte e destino dos poluentes no meio aquático. A adsorção determina a extensão do particionamento do poluente entre a fase suspensa particulada e a fase dissolvida e, portanto, modela os efeitos tóxicos, assim como a taxa de remoção dos sedimentos na coluna de água.

A relação entre a concentração de equilíbrio do poluente na fase líquida (C_w) e a concentração de equilíbrio na fase sólida (C_s) pode ser representada com a curva C_s x C_w a uma temperatura constante. Há várias teorias que descrevem as isotermas de adsorção e as duas mais populares são:

- ✓ Isoterma de Langmuir

$$C_s = (K_1 K_2 C_w) / (1 + K_1 C_w) \quad (27)$$

- ✓ Isoterma de Freundlich

$$C_s = K_f C_w^{1/n} \quad (28)$$

Onde,

K_f = uma constante.

Em um ambiente aquático, a concentração do poluente C_w na fase líquida é usualmente baixa. Nessas condições, n na equação de Freundlich é igual a 1 e o termo $K_1 C_w$ na equação de Langmuir torna-se insignificante comparável com 1, então ambas as equações podem ser reduzidas à equação:

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad (29)$$

Onde a concentração de sedimentos suspensos, C_{ss} , foi separada na definição do coeficiente de partição.



O coeficiente de partição de um componente químico, K_p , não é só função do pH e da temperatura, mas também é afetado pelas características químicas e físicas do sólido adsorvente. Estudos do comportamento de sorção-dessorção dos compostos orgânicos, especialmente os compostos hidrofóbicos e não iônicos, concluíram que o carbono orgânico ou a matéria orgânica contidos no adsorvente é o maior fator determinante do processo de adsorção. Se K_p é normalizado com a fração de carbono orgânico f_{oc} do sólido, então K_{oc} se torna independente do adsorvente:

$$K_{oc} = K_p / f_{oc} \quad (30)$$

Além disso, o coeficiente de partição baseada no carbono orgânico mostra uma excelente correlação com K_{ow} (coeficiente de partição octanol / água) e a solubilidade da água S .

Na volatilização da coluna de água, para cada liberação química, a Lei de Henry é computada:

$$H = P_{vp} / (S / M_w) \quad (31)$$

Onde,

P_{vp} = pressão de vapor (atm);

S = solubilidade (mg/l);

M_w = peso molecular (g/mol)

Se $H < 3 \times 10^{-7}$, a volatilização pode ser negligenciada. Para $H > 3 \times 10^{-7}$, uma constante adimensional, H' da lei de Henry é calculada:

$$H' = H / RT \quad (32)$$

Onde,

R = constante do gás (atm·m³/mol·°K)

T = temperatura (°K)

O coeficiente de troca da fase líquida K_5 é dado por:

$$K_5 = 20 \sqrt{44 / M_w} \quad (33)$$

e o coeficiente da troca da fase gasosa, K_6 :

$$K_6 = 3000\sqrt{18/M_w} \quad (34)$$

São utilizados para calcular o coeficiente de transferência de massa:

$$K_7 = (H'K_5K_6)/(H'K_6 + K_5) \quad (35)$$

Os coeficientes K_5 , K_6 e K_7 são em cm/hora. A transferência de massa da coluna d'água para a atmosfera para este constituinte é:

$$dm/dt = K_7m/d \quad (36)$$

Onde,

m = quantidade de massa do poluente, assumindo distribuição uniforme a uma profundidade d .

A profundidade de volatilização para substâncias dissolvidas possui o limite máximo de metade da altura da onda ou a profundidade difusiva d :

$$d = \sqrt{(2D_z\Delta t)} \quad (37)$$

Onde,

D_z = difusividade vertical (m^2/s);

Δt = intervalo de tempo do modelo (s).

A degradação permite a transformação dos múltiplos componentes inseridos no modelo. Embora as taxas de degradação por componente sejam utilizadas, tem-se o conhecimento de que os produtos de degradação podem ser mais solúveis e tóxicos que os componentes originais.



A.4 DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:


- ✓ Localização geográfica do ponto de vazamento;
- ✓ Volume/Vazão do vazamento;
- ✓ Duração da simulação;
- ✓ Tipo de óleo;
- ✓ Linha de costa;
- ✓ Batimetria;
- ✓ Grade *habitat* / tipo de ambiente (e.g., manguezais, áreas alagáveis, praias);
- ✓ Campo de corrente;
- ✓ Campo de vento;
- ✓ Temperatura do ar e do mar;
- ✓ Parâmetros de simulação (e.g. número de partículas, número de camadas verticais, número de simulações determinísticas que compõe cada cenário probabilístico, passo de tempo, intervalo de saída, fator de vento, entre outros).

A.5 BIBLIOGRAFIA

AAMO, O.M.; M. REED, P.S. DALING & O. JOHASEN, 1993. A Laboratory-Based Weathering Model: PC Version for Coupling to Transport Models. Proceedings of the 1993 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, p. 617-626.

AAMO, O.M.; M. REED & P.S. DALING, 1995. Evaluation of environmental consequences and effectiveness of oil spills operations with a possible change in first line response at the Veslefrikk field. SINTEF Report n° 95.006, 1995 SINTEF Petroleum Research.

AAMO, O.M.; K. DOWNING & M. REED, 1996. Calibration, verification and sensitivity analysis of the IKU Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) model system. Technical Report 42.4048.00/01/96, IKU, Norwegian.

Pág.	Modelagem de Derrame de Óleo para o Bloco BAR-M-346, Bacia de Barreirinhas	
A-16 / 17		

BOWDEN, K. F., 1983. Physical Oceanography of Coastal Waters. Ellis Harwood Ltd, UK. 312p.

DALING, P.S. & P.J. BRANDVIK, 2001. Weathering of oils at sea: comparisons between field data and model predictions. In: Brebbia, C.A. (Ed.). Oil Spill Modelling and Processes. Southampton: WIT Press. P. 91-106.

DALING, P.S.; P.J. BRANDVIK, D. MACKAY & O. JOHASEN, 1990. Characterization of Crude Oils for Environmental Purposes. *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 7, p. 119-224.

DOWNING, K. & M. REED, 1996. Object-oriented migration modeling for biological impact assessment. *Ecological Modelling*, Vol. 93, p. 203-219.

ICHIYE, T. ,1967. “Upper ocean boundary-layer flow determined by dye diffusion”. *Phys. Fluids Suppl.* Vol. 10, pp 270-277.

JOHANSEN, Ø., 2000: DeepBlow – A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. *Spill Science & Technology Bulletin.* Vol. 6, No. 2: 103 – 111.


KULLENBERG, G., 1982. Pollutant transfer and transport in the sea. CRC Press, Boca Raton, Fl. , Vol. I. 227 p.

OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep Sea Research* 18:789-802.

OKUBO, A., 1974. Some speculation on oceanic diffusion diagrams. In Kullenberg, G. and Talbot, J. (eds), Physical Processes Responsible for Dispersal of Pollutants in the Sea. *Rapp. Proc. Verb Penn. Cons. Inter. Expl. Mer.* 167: 77-85.

REED, M., 1989. The physical fates component of the CERCLA Type A model system. *Oil and Chemical Pollution* 5:99-124.

REED, M.; O.M. AAMO & P.S. DALING, 1995. Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR. *Spill Science and Technology, Pergamon Press* 2(1): 67-74.

Revisão 02 03/2016	Tt 15-069	_____	
		Responsável Técnico	



REED, M.; O.M. AAMO & K. DOWNING, 1995. Calibration and testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of 19th AMOP Seminar, Edmonton, Alberta, p. 689-726.

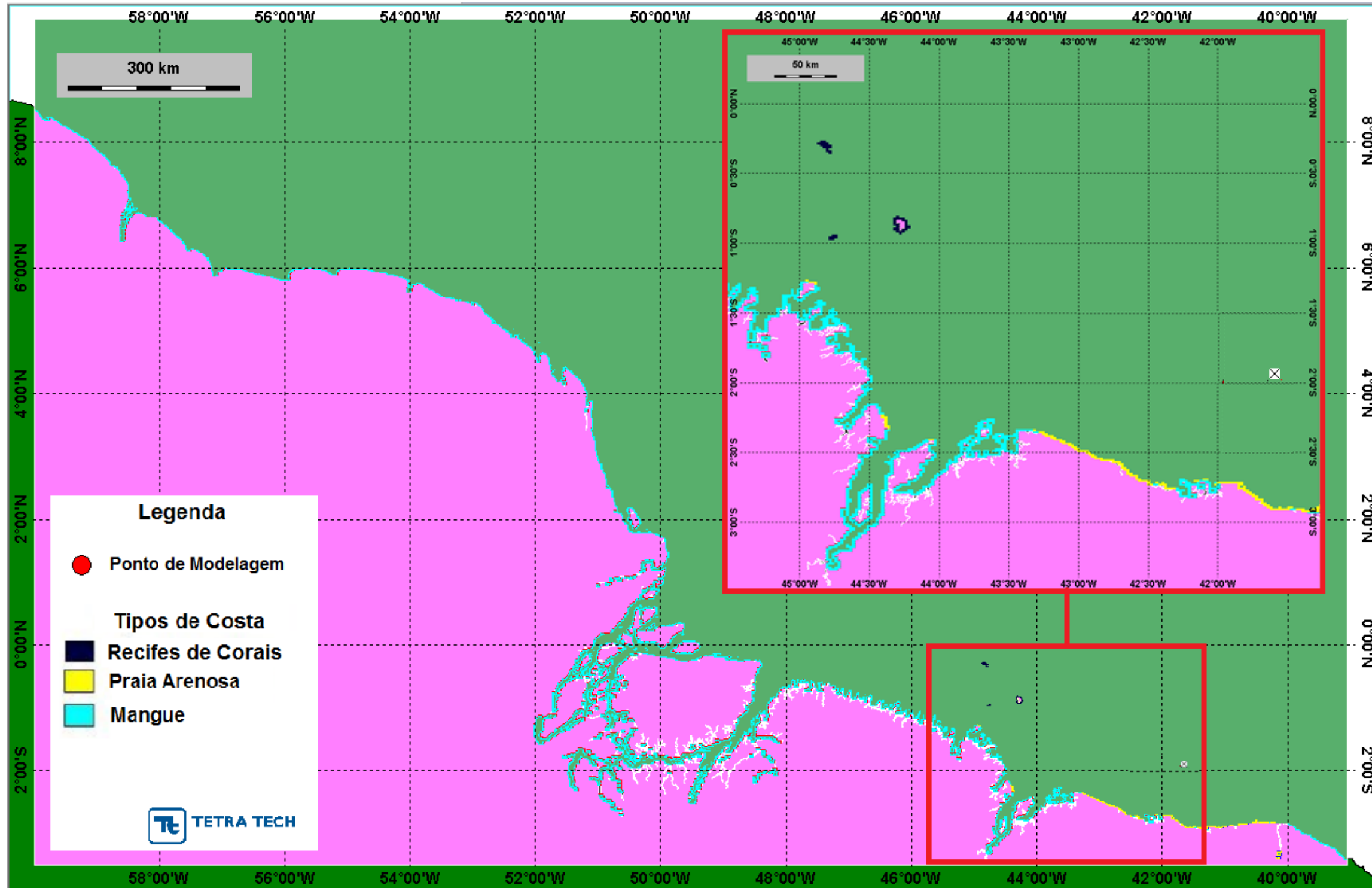
REED, M., O.M. AAMO, AND K. DOWNING, 1996. Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of 19th AMOP Seminar, Edmonton, Alberta. p. 689 – 726.

REED, M. AND E. GUNDLACH, 1989. Hindcast of the Amoco Cadiz event with a coastal zone oil spill model. *Oil and Chemical Pollution* 5(6):411-449.

THIBODEAUX, L. J., 1979. Chemodynamics. John Wiley and Sons, NY. 501 pp.



ANEXO B – GRADE HABITAT



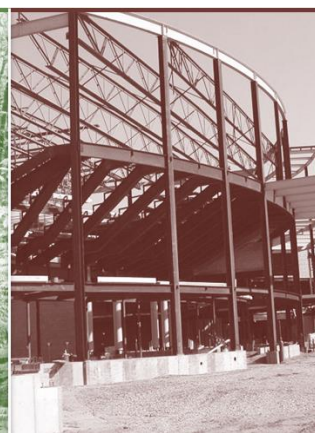


ANEXO C – MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Modelagem Hidrodinâmica para a Bacia de Barreirinhas, Região do Bloco BAR-M-346

Revisão 00

Dezembro/2015





TETRA TECH

Rua Fidalga, 711

Vila Madalena – São Paulo – SP

CEP 05432-070

<http://www.tetrattech.com>



BP Energy do Brasil

Av. Atlântica, 1130, 7º andar – Copacabana

Rio de Janeiro – RJ

CEP 22021-000

www.bp.com

***Modelagem Hidrodinâmica para a
Bacia de Barreirinhas, Região
do Bloco BAR-M-346***

Equipe Técnica TETRA TECH:

ANA CAROLINA R. LAMMARDO

BRUNO SCHERR MARTINS

BRUNO VICENTE PRIMO DE SIQUEIRA

CAIO EADI STRINGARI

EDUARDO A. YASSUDA

GABRIEL CLAUZET

MARIANA LINO GOUVEA

RICARDO BUSOLI

RONALDO PALMEIRA

TITO CONTE

Oceanógrafa

Oceanógrafo

Oceanógrafo

Oceanógrafo

Engenheiro Mecânico

Físico

Meteorologista

Oceanógrafo

Meteorologista

Oceanógrafo

Revisão 00

Dezembro/ 2015

TETRA TECH é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da TETRA TECH como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da TETRA TECH for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da TETRA TECH”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a TETRA TECH.

TETRA TECH, 2015. Modelagem Hidrodinâmica para a Bacia de Barreirinhas, Região do Bloco BAR-M-346. Relatório Técnico, Revisão 00 (04 de dezembro de 2015). 104pp+Anexo.

ÍNDICE GERAL

CONTROLE DE REVISÕES	1
ÍNDICE GERAL	3
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	9
RESUMO	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
2.1. Características Meteorológicas	15
2.2. Características Oceanográficas	17
3. IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA	21
3.1. Configurações Gerais	21
3.2. Discretização do Domínio Espacial	23
3.3. Condições Contorno	25
3.3.1. Correntes (Contorno Oceânico)	26
3.3.2. Vento (Contorno Atmosférico)	29
3.3.3. Vazão (Contorno Continental)	35
3.4. Condições Iniciais	44
4. AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA	47
4.1. Dados utilizados	48
4.2. Avaliação da Maré	49
4.3. Avaliação das Correntes	57
4.4. Avaliação da Temperatura	70
4.4.1. Campos Superficiais	71
4.4.2. Perfis Verticais	75
4.5. Avaliação da Salinidade	78
4.5.1. Campos Superficiais	78
4.5.2. Perfis Verticais	83
5. RESULTADOS PARA MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO E DISPERSÃO DE CASCALHOS	85

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
7. BIBLIOGRAFIA	98
8. EQUIPE TÉCNICA	102
ANEXO 1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D.....	A-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das Bacias Sedimentares que abrangem a área de modelagem, assinalando o Bloco BAR-M-346 da BP na região da Bacia de Barreirinhas, com detalhe para o ponto de modelagem de óleo e cascalhos.....	14
Figura 2 – Vento médio ao nível de 10 metros para os meses de verão do Hemisfério Sul (janeiro, fevereiro e março), gerados a partir da reanálise CFSR referente ao período de 1979-2010. Fonte: TETRA TECH.	15
Figura 3 – Vento médio ao nível de 10 metros para os meses de inverno do hemisfério Sul (julho, agosto e setembro), gerados a partir da reanálise CFSR referente ao período de 1979-2010. Fonte: TETRA TECH.	16
Figura 4 – Média mensal da precipitação medida na estação INMET de Macapá (30 anos de dados).....	17
Figura 5 – Representação esquemática da circulação média e anéis anticiclônicos na porção oeste do oceano Atlântico Tropical; em vermelho, trajetórias das massas de água quentes, e em azul, trajetórias da APAN. As correntes indicadas são: Corrente Norte do Brasil (CNB), Sub-Corrente Equatorial (SCE), Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE), Corrente Sul Equatorial (CSE), e Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP). Adaptado de Dengler et al. (2004).....	19
Figura 6 – Mapa cotidal de amplitude (cores, m) e fase (linhas, °) para a componente M2.	20
Figura 7 – Grade computacional do modelo hidrodinâmico Delft3D.....	24
Figura 8 – Batimetria (m) associada à grade numérica do modelo Delft3D.....	24
Figura 9 – Stickplots das correntes junto à fronteira leste do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (2,0°S e 40,0°W, quadro superior) e Delft3D (1,83°S e 39,92°W, quadro inferior). Fonte: TETRA TECH.	27
Figura 10 – Stickplots das correntes junto à fronteira norte do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (2,4°N e 45,0°W, quadro superior) e Delft3D (2,35°N e 45,63°W, quadro inferior). Fonte: TETRA TECH.	28
Figura 11 – Stickplots das correntes junto à fronteira oeste do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (5,5°N e 52,0°W, quadro superior) e Delft3D (5,54°N e 51,75°W, quadro inferior). Fonte: TETRA TECH.	29
Figura 12 – Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o verão (janeiro a março), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.....	30
Figura 13 – Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o outono (abril a junho), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.	30
Figura 14 - Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o inverno (julho a setembro), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.....	31
Figura 15 - Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para a primavera (outubro a dezembro), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.....	31
Figura 16 – Histograma direcional de vento (CFSv2) para os períodos de verão (superior esquerdo), outono (superior direito), inverno (inferior esquerdo) e primavera (inferior direito) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica para direção. Fonte: TETRA TECH.	33

Figura 17 - Subdivisão das regiões de inserção das vazões dos principais rios da região de estudo.....	36
Figura 18 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do rio Amazonas.....	37
Figura 19 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Capim.....	38
Figura 20 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Guama.....	39
Figura 21 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Grajaú.....	40
Figura 22 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Mearim.....	41
Figura 23 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Itapecuru.....	41
Figura 24 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Munin.....	42
Figura 25 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m ³ /s) do Rio Pindaré.....	43
Figura 26 – Campo de temperatura na camada superficial, utilizado como condição inicial da modelagem hidrodinâmica para os períodos representativos do verão (quadro superior) e inverno (quadro inferior) do Hemisfério Sul.....	44
Figura 27 – Campo de salinidade na camada superficial, utilizado como condição inicial da modelagem hidrodinâmica para os períodos representativos de verão (quadro superior) e inverno (quadro inferior) do Hemisfério Sul.....	45
Figura 28 – Série temporal da energia cinética por unidade de massa, integrada em todo o domínio simulado. A linha vermelha indica o valor referente a duas vezes o desvio-padrão da série.....	46
Figura 29 – Localização dos dados utilizados no processo de validação: fundeios WOCE K327, K328, K340 e K361 para correntes; pontos de análise do NODC através de perfis verticais de temperatura e salinidade; e pontos de análise de maré referentes às estações da FEMAR do Porto Luiz Correia e Plataforma JP-15. A localização do ponto de produção da BP na Bacia de Barreirinhas também é indicado.....	49
Figura 30 – Previsão harmônica de maré obtida para a região do Porto de Luiz Correia (PI) para o período de referência (ano de 2014), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR. Fonte: TETRA TECH.....	53
Figura 31 – Previsão harmônica de maré obtida para a região da Plataforma JP-15 (MA) para o período de referência (ano de 2014), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR. Fonte: TETRA TECH.....	53
Figura 32 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m) para o período de 01/06/2014 a 30/06/2014 na estação do Porto Luiz Correia, mostrando os valores previstos em azul e a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica em vermelho.....	54
Figura 33 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m) para o período de 06/07/2014 a 05/08/2014 na estação da Plataforma JP-15, mostrando os valores previstos em azul e a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica em vermelho.....	54
Figura 34 - Espectro total de amplitudes para a elevação (m), comparando dados da previsão harmônica (azul) e resultados da modelagem hidrodinâmica (vermelho) no ponto da estação do Porto Luiz Correia.....	55
Figura 35 - Espectro total de amplitudes para a elevação (m), comparando dados da previsão harmônica (azul) e resultados da modelagem hidrodinâmica (vermelho) no ponto da estação da Plataforma JP-15.....	55

- Figura 36** – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....59
- Figura 37** – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....60
- Figura 38** – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.61
- Figura 39** – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K328, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....62
- Figura 40** – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K328, obtidas a partir do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.63
- Figura 41** – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K328, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.64
- Figura 42** – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....65
- Figura 43** – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....66
- Figura 44** – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.67
- Figura 45** – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....68
- Figura 46** – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....69
- Figura 47** – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.70
- Figura 48** – Campos superficiais de temperatura do mar para o verão de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.72
- Figura 49** – Campos superficiais de temperatura do mar para o outono de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.73
- Figura 50** – Campos superficiais de temperatura do mar para o inverno de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.74
- Figura 51** – Campos superficiais de temperatura do mar para a primavera de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: Tetra Tech.75
- Figura 52** – Perfis verticais sazonais de temperatura no ponto de estudo da BP, a partir dos dados NODC (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.77
- Figura 53** – Campos superficiais de salinidade do mar para o verão de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....79
- Figura 54** – Campos superficiais de salinidade do mar para o outono de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....80
- Figura 55** – Campos superficiais de salinidade do mar para o inverno de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.....81
- Figura 56** – Campos superficiais de salinidade do mar para a primavera de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.82

Figura 57 – Perfis verticais sazonais de salinidade no ponto de estudo da BP, a partir dos dados NODC (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.84

Figura 58 - Representação da população de derivadores mantidos pelo programa da NOAA, ao todo 1.267 derivadores. Fonte: NOAA.....86

Figura 59 – Campos de corrente superficial para o período de janeiro a junho, a partir de resultados da modelagem (superior) e pela climatologia de derivadores (inferior). Fonte: TETRA TECH.....87

Figura 60 – Campos de corrente superficial para o período de julho a dezembro, a partir de resultados da modelagem (superior) e pela climatologia de derivadores (inferior). Fonte: Tetra Tech.....88

Figura 61 – Stickplots das correntes simuladas no ponto de análise da BP nas camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do verão (janeiro a junho). Fonte: TETRA TECH.....90

Figura 62 – Rosas de corrente obtidas a partir dos resultados da modelagem nos pontos de análise da BP, camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do verão (janeiro a junho). Fonte: TETRA TECH.....91

Figura 63 – Stickplots das correntes simuladas no ponto de análise P1 nas camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do inverno (julho a agosto). Fonte: TETRA TECH.....93

Figura 64 – Rosas de corrente obtidas a partir dos resultados da modelagem nos pontos de análise P1 e P2, camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do inverno (julho a dezembro). Fonte: TETRA TECH.94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das simulações do Delft3D.	22
Tabela 2 - Descrição dos parâmetros físicos utilizados nas simulações do Deslft3D.	22
Tabela 3 - Características da grade numérica.	23
Tabela 4 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de verão (janeiro, fevereiro e março) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.	34
Tabela 5 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de outono (abril, maio e junho) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.	34
Tabela 6 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de inverno (julho, agosto e setembro) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.	34
Tabela 7 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de primavera (outubro, novembro e dezembro) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.	35
Tabela 8 – Tabela resumo das vazões inseridas no modelo (m ³ /s).....	43
Tabela 9 - Informações das bases de dados oceanográficos utilizados no processo de validação.	48
Tabela 10 - Descrição das componentes harmônicas e médias das sizíguas e quadraturas do Porto Luiz Correia. Fonte: FEMAR.	50
Tabela 11 - Descrição das componentes harmônicas e médias das sizíguas e quadraturas da Plataforma JP-15. Fonte: FEMAR.	51
Tabela 12 – Índices de avaliação dos resultados de elevação do modelo.....	57
Tabela 13 – Coordenadas, profundidades de coleta e espessura da lâmina d’água dos dados de corrente dos fundeios WOCE para a região da Bacia de Barreirinhas (cruzeiro ACM-7).....	58
Tabela 14 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de superfície no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014.	92
Tabela 15 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada intermediária no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014.	92
Tabela 16 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de fundo no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014...	92
Tabela 17 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de superfície no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014.	95

Tabela 18 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada intermediária no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014.95

Tabela 19 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de fundo no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014. ...95

RESUMO

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, foi selecionado como ferramenta para realizar uma modelagem hidrodinâmica na região da Bacia de Barreirinhas. Os resultados do modelo de larga escala HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*) foram utilizados como condições de contorno para que o Delft3D reproduzisse a dinâmica de talude e a circulação sobre a plataforma e região costeira de forma adequada. Para representação da dinâmica de águas profundas em regiões adjacentes a Bacia de Barreirinhas os resultados do modelo Delft3D foram acoplados aos resultados do HYCOM.

Os resultados obtidos com essa modelagem numérica foram utilizados para as simulações de deriva de óleo e dispersão de cascalhos na região, com o objetivo de dar suporte à BP Energy do Brasil nos estudos ambientais na região da Bacia de Barreirinhas, especificamente no Bloco BAR-M-346.

Através de comparações realizadas entre os resultados da modelagem numérica e uma gama de dados observacionais disponíveis, foi possível constatar que as ferramentas e as metodologias adotadas reproduziram satisfatoriamente as principais características da circulação na região, atendendo aos objetivos deste estudo.

1. INTRODUÇÃO

Para dar suporte à BP Energy do Brasil nos estudos ambientais na região da Bacia de Barreirinhas, com enfoque no Bloco BAR-M-346, a TETRA TECH realizou uma modelagem hidrodinâmica a fim de reproduzir a circulação oceânica da região. O objetivo principal foi a obtenção de uma base hidrodinâmica capaz de reproduzir a complexa dinâmica de correntes da Área de Estudo para utilização em simulações de deriva de óleo.

Com o intuito de obter uma melhor compreensão dos processos físicos da área de estudo representados nesta modelagem hidrodinâmica, bem como auxiliar no processo de avaliação do modelo, foi realizado um levantamento de informações pretéritas (meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas) na região de interesse. Essas informações foram importantes para o entendimento da dinâmica na região e para garantir a representação adequada das condições hidrodinâmicas pela ferramenta de modelagem.

O sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW (DELTARES, 2013) foi selecionado como ferramenta para atingir os objetivos propostos nesse estudo. O modelo de larga escala HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*; BLECK, 2002) foi acoplado ao Delft3D para garantir a representação, em águas profundas, do grande domínio espacial necessário à modelagem de deriva de óleo. Desta forma, o modelo Delft3D, foi responsável por representar a complexa dinâmica costeira, sua interação com a plataforma e regiões profundas nas localidades do Bloco BAR-M-346. O HYCOM foi utilizado para representação da dinâmica em larga escala nas adjacências da Bacia de Barreirinhas.

No Capítulo 2, a seguir, é apresentada uma breve descrição da área de estudo. Em seguida o Capítulo 3 apresenta detalhadamente os procedimentos adotados na implementação da modelagem numérica. A avaliação dos resultados da modelagem, a partir da comparação com diversas bases de dados observacionais, é apresentada no Capítulo 4. Por fim, nos Capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados da base hidrodinâmica obtida para utilização na modelagem de deriva de óleo e dispersão de cascalhos, e as considerações finais, respectivamente.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Barreirinhas localiza-se na margem equatorial brasileira, cobrindo parte da costa do Estado do Maranhão e a plataforma continental adjacente (Figura 1). Trata-se de uma depressão limitada a noroeste pela Plataforma de Ilha de Santana, e a leste pelo Alto de Tutóia. Sua área total é de aproximadamente 40.000 km², sendo 10.000 km² de área terrestre e 30.000 km² de área marítima.

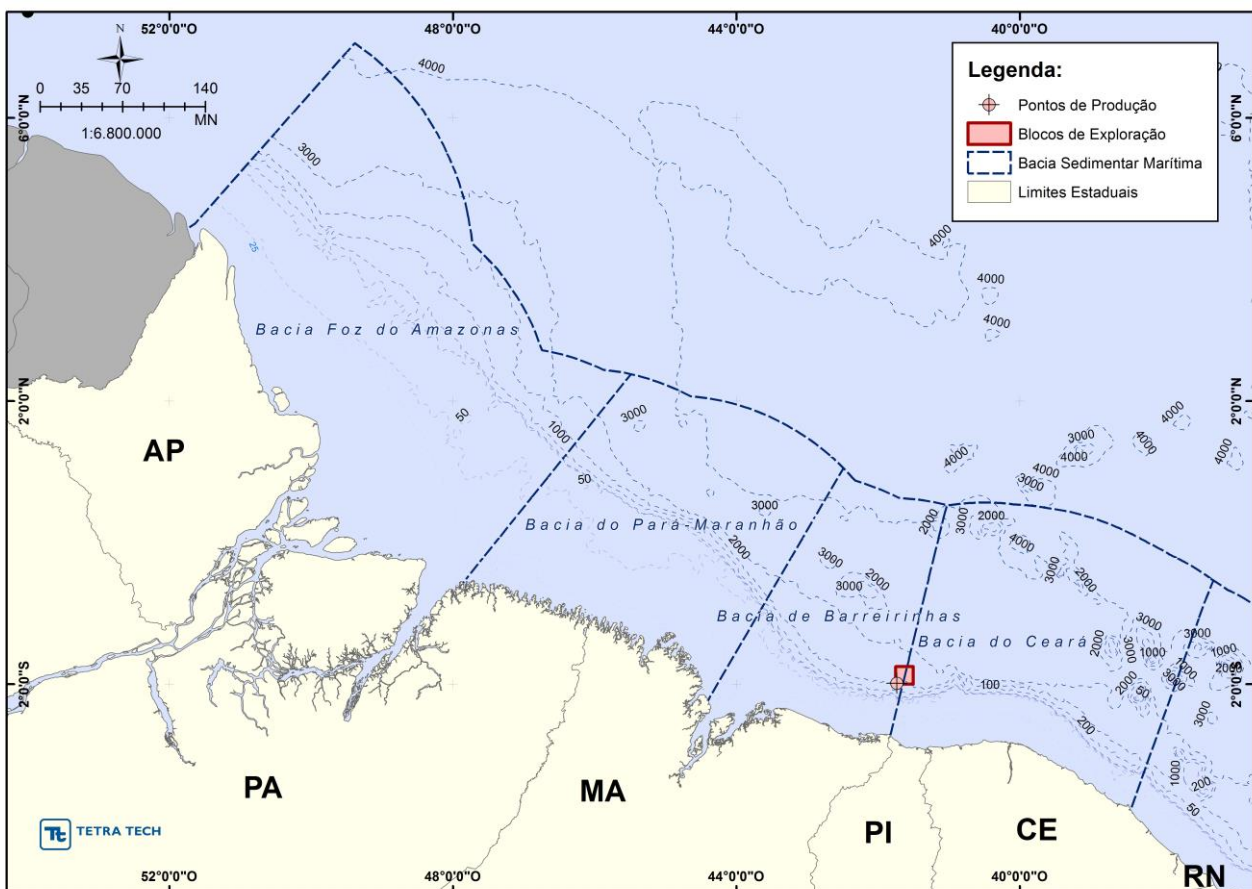


Figura 1 - Representação das Bacias Sedimentares que abrangem a área de modelagem, assinalando o Bloco BAR-M-346 da BP na região da Bacia de Barreirinhas, com detalhe para o ponto de modelagem de óleo e cascalhos.

2.1. Características Meteorológicas

A circulação atmosférica na região Norte-Nordeste do Brasil é dominada, em larga escala, pelo deslocamento sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este sistema define-se na região de convergência dos ventos alísios do Hemisfério Norte (de nordeste) e do Hemisfério Sul (de sudeste), apresentando uma zona de baixa pressão atmosférica, movimentos ascendentes de ar, nebulosidade e chuvas intensas, seguindo as regiões onde a temperatura da superfície do mar é mais elevada (CAVALCANTI *et al.*, 2009). No período de verão do Hemisfério Sul (HS), a ZCIT está posicionada mais ao sul, conforme ilustrado na Figura 2. No período de inverno, esta célula de convecção está situada mais ao norte (Figura 3), assim como descrito por Satyamurty *et al.* (1998).

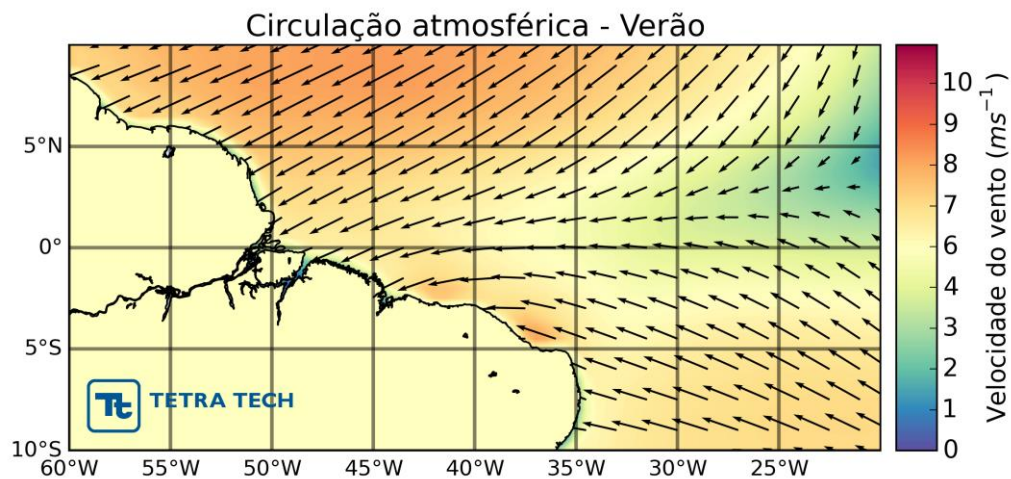


Figura 2 – Vento médio ao nível de 10 metros para os meses de verão do Hemisfério Sul (janeiro, fevereiro e março), gerados a partir da reanálise CFSR referente ao período de 1979-2010. Fonte: TETRA TECH.

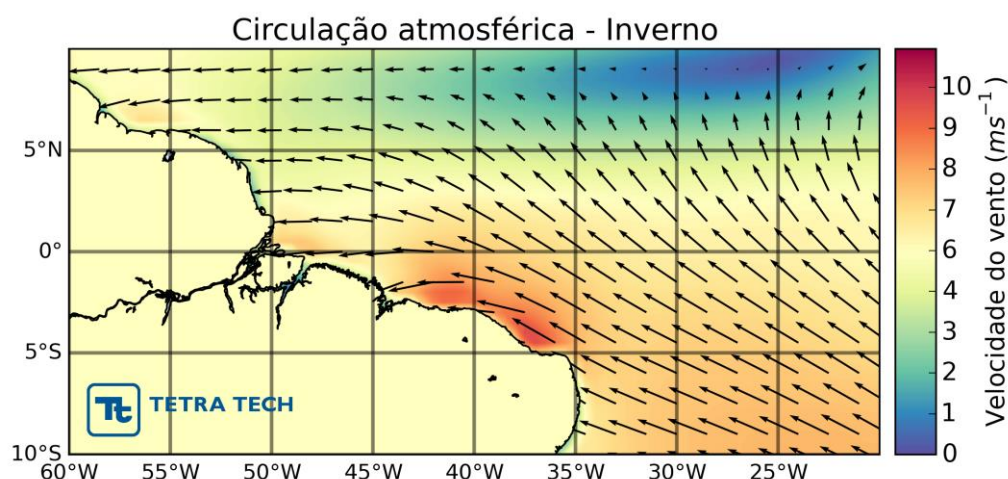


Figura 3 – Vento médio ao nível de 10 metros para os meses de inverno do hemisfério Sul (julho, agosto e setembro), gerados a partir da reanálise CFSR referente ao período de 1979-2010. Fonte: TETRA TECH.

Na costa norte do Brasil observa-se que no período de janeiro a março, quando a ZCIT se encontra na sua posição mais ao sul, o vento médio é proveniente do quadrante NE. Já entre julho e setembro, quando a ZCIT está deslocada mais para norte, o vento médio é predominante do quadrante E.

Os principais fatores dinâmicos que determinam a precipitação na porção norte do NEB (Nordeste Brasileiro) são os sistemas sinóticos oriundos da ZCIT em conjunto com circulações atmosféricas regionais de meso e microescala. A máxima precipitação nesta região ocorre nos meses de março e abril.

Uma análise acerca do regime anual de chuvas é mostrada através de pluviogramas elaborados a partir de dados de precipitação acumulada na rede de pluviômetros das estações do INMET. A Figura 4 apresenta médias mensais de uma série de 30 anos de dados de precipitação da estação de Macapá. Observa-se que a estação de seca ocorre entre os meses de agosto e dezembro. Os períodos mais chuvosos estendem-se de janeiro a maio, com precipitação média mensal acima de 150 mm. O máximo anual é atingido em março, com valor superior a 400 mm.

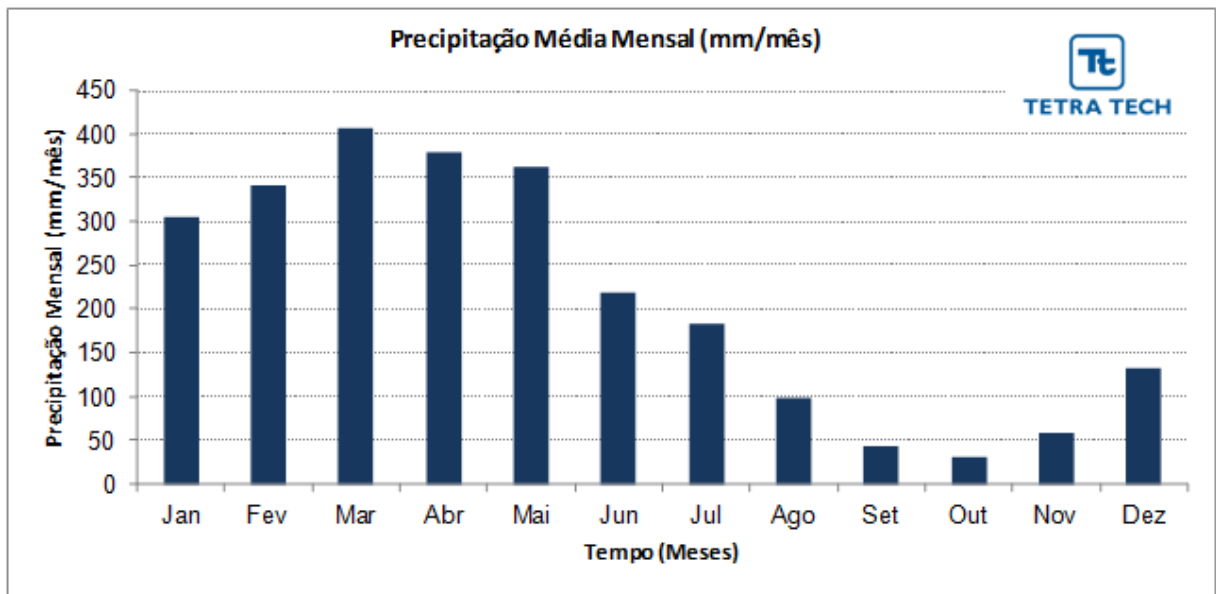


Figura 4 – Média mensal da precipitação medida na estação INMET de Macapá (30 anos de dados).

2.2. Características Oceanográficas

O padrão de circulação na região Norte do Brasil apresenta elevada complexidade. Na região oceânica e do talude continental há predominância do sinal da Corrente Norte do Brasil e da Corrente de Contorno Oeste Profunda. Existe também influência significativa dos sinais de mesoescala, refletindo-se na variabilidade nos padrões mais energéticos presentes na área. A amplificação da maré sobre a plataforma continental amazônica é elevada, em co-oscilação e ressonância com as bacias menores.

Circulação de Baixa Frequência

A circulação de baixa frequência (larga escala) predominante na porção oeste do Oceano Atlântico Tropical é formada pelas correntes relacionadas a seguir. Um esquema ilustrativo destas correntes pode ser visualizado na Figura 5 (adaptada de DENGLER *et al.*, 2004):

- Corrente Sul Equatorial (CSE): fluxo largo (latitude média de 10°S), para oeste, com velocidades entre 0,1 e 0,3 m/s. Bifurca-se próximo à costa do Brasil em diferentes profundidades e contribui para a formação da Corrente do Brasil na direção sul, e da Corrente Norte do Brasil na direção norte;
- Corrente Norte do Brasil (CNB): formada pela sobreposição do fluxo da CSE com o fluxo da Subcorrente Norte do Brasil. Caracteriza-se por ser um fluxo intenso que leva ao Hemisfério Norte cerca de $\frac{3}{4}$ da água transportada pela Corrente Sul Equatorial (STRAMMA *et. al.*, 1990; STRAMMA & ENGLAND, 1999);
- Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE): fluxo para leste, entre 3°N e 10°N;
- Subcorrente Equatorial (SCE): fluxo subsuperficial para leste com núcleo localizado em cerca de 100 m de profundidade e velocidades máximas excedendo 1,2 m/s.
- Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP): ocupa regiões profundas ao longo do contorno oeste. Responsável por transportar Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) para o Hemisfério Sul.

A Corrente Norte do Brasil (CNB) se origina em torno da latitude de 10,5°S onde a Corrente Sul Equatorial (CSE) bifurca-se na costa brasileira originando a CNB no seu ramo para o norte, e a Corrente do Brasil (CB) em seu ramo sul. Apenas uma pequena parte da CSE origina o ramo sul (CB), enquanto que o restante origina a CNB, isso resulta em uma intensa corrente fluindo para o norte com um transporte médio de 14 Sv (SILVEIRA *et al.*, 1994). Sv é uma unidade de média que representa 10^6 m³/s.

A CNB apresenta valores de velocidades da ordem de 1 m/s e flui ao longo da região do Talude Continental até aproximadamente 7°N, onde se separa da costa e forma uma retroflexão na direção leste. A partir de então esta corrente origina a Contra-Corrente Norte Equatorial. A posição da retroflexão apresenta variação sazonal associada à migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ).

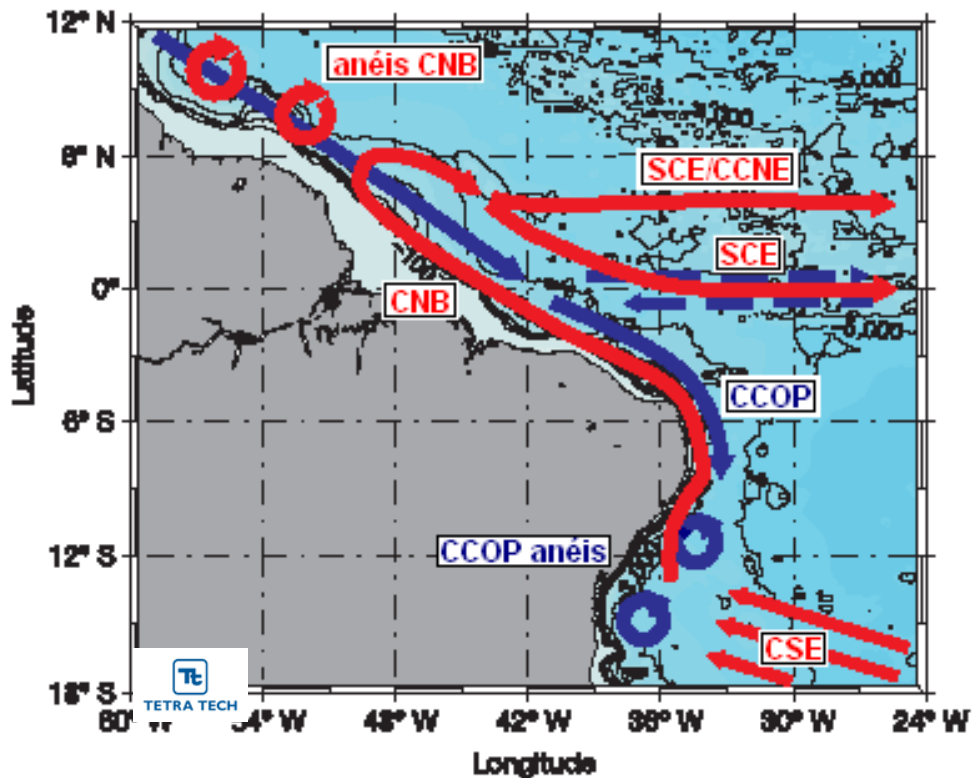


Figura 5 – Representação esquemática da circulação média e anéis anticiclônicos na porção oeste do oceano Atlântico Tropical; em vermelho, trajetórias das massas de água quentes, e em azul, trajetórias da APAN. As correntes indicadas são: Corrente Norte do Brasil (CNB), Sub-Corrente Equatorial (SCE), Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE), Corrente Sul Equatorial (CSE), e Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP). Adaptado de Dengler et al. (2004).

Circulação de Alta Frequência

A circulação observada de alta frequência (pequena escala) é influenciada pelo acoplamento dos processos da região de oceano profundo e plataforma (PEREIRA, 2000). Sobre a plataforma amazônica predomina a banda semidiurna da maré, com influência de componentes quartodiurnas em regiões mais costeiras. As correntes de maré M2 são aproximadamente unidimensionais e cruzam as isóbatas sobre a plataforma (Figura 6). Isso ocorre em função da dinâmica equatorial e da existência de modos ressonantes na plataforma, que geram variações na amplitude de maré à medida que a mesma se aproxima da plataforma amazônica. Próximo à foz do Rio Amazonas, a amplitude da maré é amortecida pelo efeito direto do aporte de água do rio (GODIN, 1991). Parte da dissipação da energia da componente M2 ocorre na plataforma média e interna.

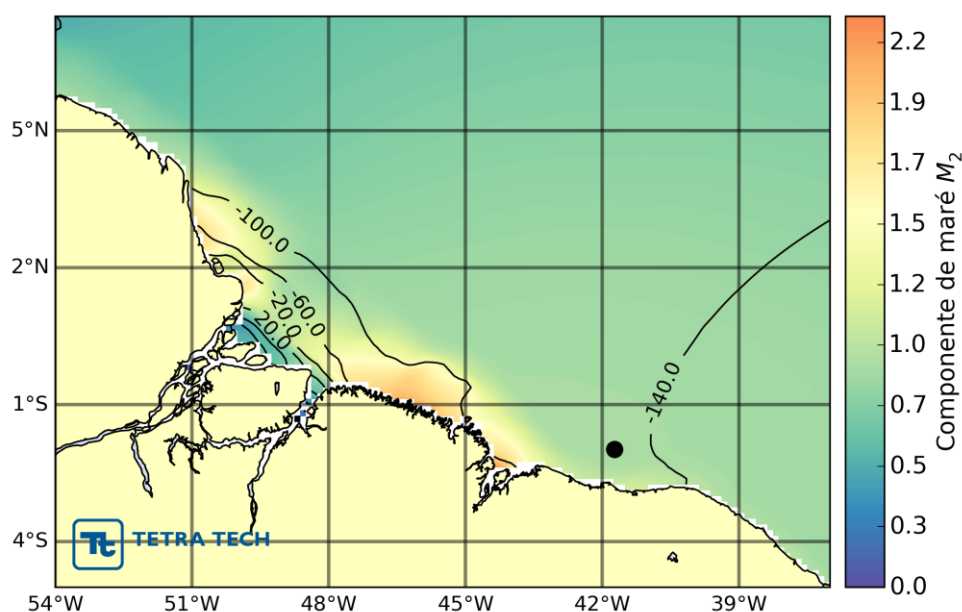


Figura 6 – Mapa cotidal de amplitude (cores, m) e fase (linhas, °) para a componente M_2 .

Temperatura e Salinidade

A região Oeste do Oceano Atlântico Equatorial é formada pelas massas d'água provenientes do Atlântico Sul que cruzam o Equador e se misturam com as águas do Atlântico Norte, que ocupam a região por volta dos 10°N (SVERDRUP *et. al*, 1942). A região Equatorial é caracterizada por uma forte termoclina e picnoclina. As médias anuais das temperaturas superficiais são superiores a 26°C, resultado dos efeitos da exposição à intensa radiação solar nestas latitudes. Profundidades superiores à picnoclina são caracterizadas por um intenso aumento de densidade em direção ao fundo. Nesta região, as características das águas encontradas são controladas principalmente pelas massas oriundas do Atlântico Sul, transportadas principalmente pela CNB (SVERDRUP *et. al*, 1942; TOMCZAK & GODFREY, 2001).

Assim como descrito para a temperatura, o padrão de distribuição da salinidade na região obedece as características das águas provenientes do Atlântico Sul. Nesse caso, águas com alta salinidade formadas no Atlântico Central ao longo da CSE fluem em direção ao Equador, se misturam e afundam quando encontram massas menos salinas transportadas pelas correntes da Guiana e das Antilhas (SVERDRUP *et. al*, 1942; TOMCZAK & GODFREY, 2001).

3. IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Um modelo hidrodinâmico foi implementado para simular o campo de correntes na região da Bacia de Barreirinhas, bem como no extenso domínio necessário à modelagem de deriva de óleo. Para representar as correntes na região costeira, de plataforma e profunda na região de interesse foi selecionado o sistema de modelos numéricos Delft3D, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW (DELTAIRES, 2013). Este sistema de modelos é capaz de simular a circulação hidrodinâmica em alta resolução como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente dos ventos, e a transferência de fluxos proveniente de modelos de meso e larga escala como, por exemplo, o HYCOM¹. As principais características do Delft3D-FLOW são descritas no Anexo 1.

3.1. Configurações Gerais

A seguir são listadas e descritas as principais configurações adotadas para as simulações numéricas do Delft3D, bem como das parametrizações e constantes utilizadas nesta modelagem. Detalhes acerca das configurações do modelo são apresentados na Tabela 1 e descrições das constantes e parâmetros físicos, assim como seus valores correspondentes e unidades, são apresentadas na Tabela 2.

A definição dos períodos de simulação da modelagem hidrodinâmica, e também de deriva de óleo, teve em vista atender aos critérios de sazonalidade identificados no diagnóstico de meio físico, que aponta como dominante a influência do deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a variação intra-anual dos parâmetros ambientais. Uma vez que este sistema tem seu posicionamento ao sul do Equador nos períodos de verão e outono, afastando-se para o Hemisfério Norte no inverno e primavera, foram determinados dois períodos para realização das modelagens: janeiro a junho (representativo do período de verão) e julho a dezembro

¹ HYbrid Coordinate Ocean Model <<http://www.hycom.org>>. Último acesso em 25/08/2015.

(representativo do período de inverno). É importante notar que a denominação de verão e inverno segue os períodos no referencial do Hemisfério Sul.

Tabela 1 - Características das simulações do Delft3D.

Início da simulação de verão	01/12/2013
Final da simulação de verão	10/08/2014
Início da simulação de inverno	01/06/2014
Final da simulação de inverno	10/02/2015
Passo de tempo (min)	5
Níveis verticais	21
Tipo de discretização vertical	Níveis z
Modelo de turbulência	k-l
Lei de rugosidade de fundo	Manning

Tabela 2 - Descrição dos parâmetros físicos utilizados nas simulações do Delft3D.

DESCRIÇÃO	ID	VALOR	UNIDADE
Inundação/secamento de células	Dryflp	Sim	-
Aceleração da gravidade	Ag	9,810	m ² /s
Densidade da água a temperatura e salinidade padrão	Rhow	1,000	kg/m ³
Densidade do ar	Rhoa	1,000	kg/m ³
Rugosidade de fundo na direção "u"	Ccofu	0,200	s/m ^{1/3}
Rugosidade de fundo na direção "v"	Ccofv	0,200	s/m ^{1/3}
Viscosidade turbulenta horizontal (uniforme)	Vicouv	10,000	m ² /s
Difusividade turbulenta horizontal (uniforme)	Dicouv	100,000	m ² /s
Viscosidade turbulenta vertical (uniforme)	Vicoww	0,001	m ² /s
Difusividade turbulenta vertical (uniforme)	Dicoww	0,001	m ² /s
Profundidade limiar para inundação/secamento	Dryflc	0,100	m
Profundidade marginal nas áreas rasas	Dco	-999,000	m
Tempo p/ suavização condições de contorno	Tlfsmo	60,000	min
Coefficientes de arrasto do vento	Wstres	0,00063 (vel _{wind} =0m/s) 0,00723 (vel _{wind} =100m/s)	-

3.2. Discretização do Domínio Espacial

A grade implementada no Delft3D representa um compromisso entre a descrição dos processos hidrodinâmicos presentes na região de interesse (escala temporal e espacial), dos recursos computacionais disponíveis no período de execução da simulação e do tempo de processamento necessário. Dentro desse contexto, foi implementada uma grade numérica com 21 camadas z na vertical. O domínio da grade abrange a região costeira do estado do Maranhão e uma pequena porção do estado do Piauí. As características da grade são apresentadas na Tabela 3 e sua discretização espacial na Figura 7. Cabe ressaltar que a resolução espacial da grade é variável, se ajustando de forma a melhor representar as regiões próximas da costa. Esta resolução resolve de maneira adequada a circulação de mesoescala e sua interação com a microescala na região, atendendo ao propósito do estudo.

Os dados de batimetria utilizados na modelagem foram obtidos junto ao projeto GEBCO² e têm resolução espacial de 30 segundos de grau. Esses dados foram interpolados para o domínio computacional e o resultado final da projeção da batimétrica foram ilustrados na Figura 8.

Tabela 3 - Características da grade numérica.

Número de elementos	Resolução mínima	Resolução máxima
37931	1,60 km ²	85,95 km ²

² General Bathymetric Chart of the Ocean <http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/>. Último acesso em 25/08/2015.

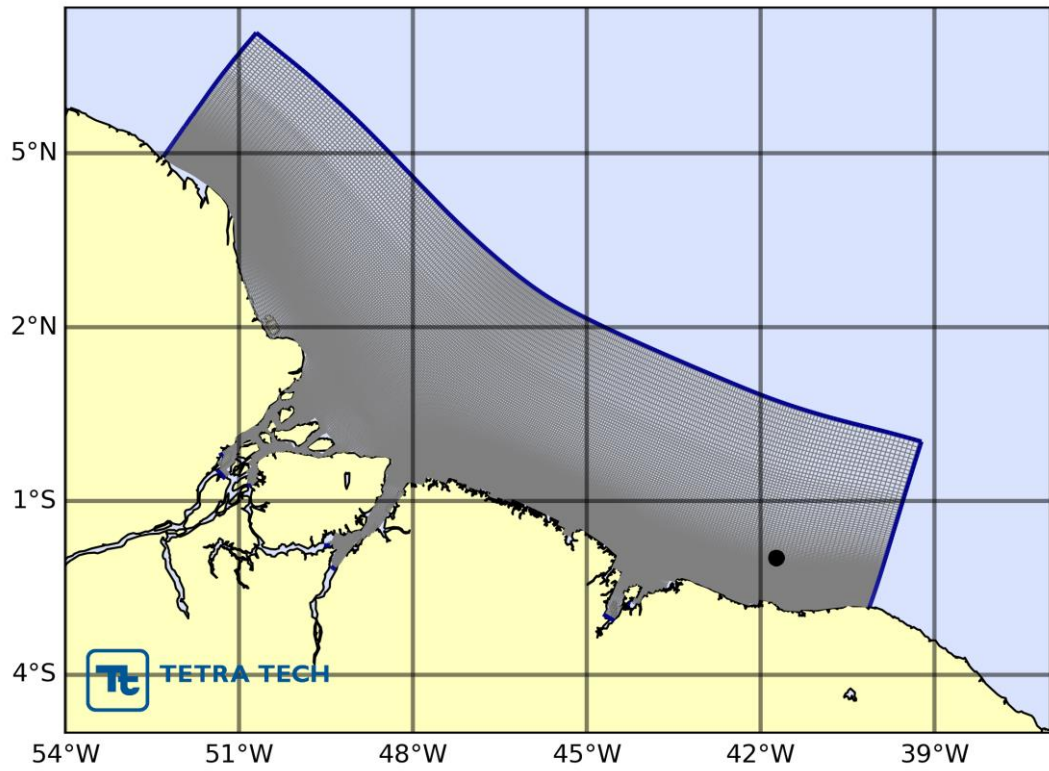


Figura 7 – Grade computacional do modelo hidrodinâmico Delft3D.

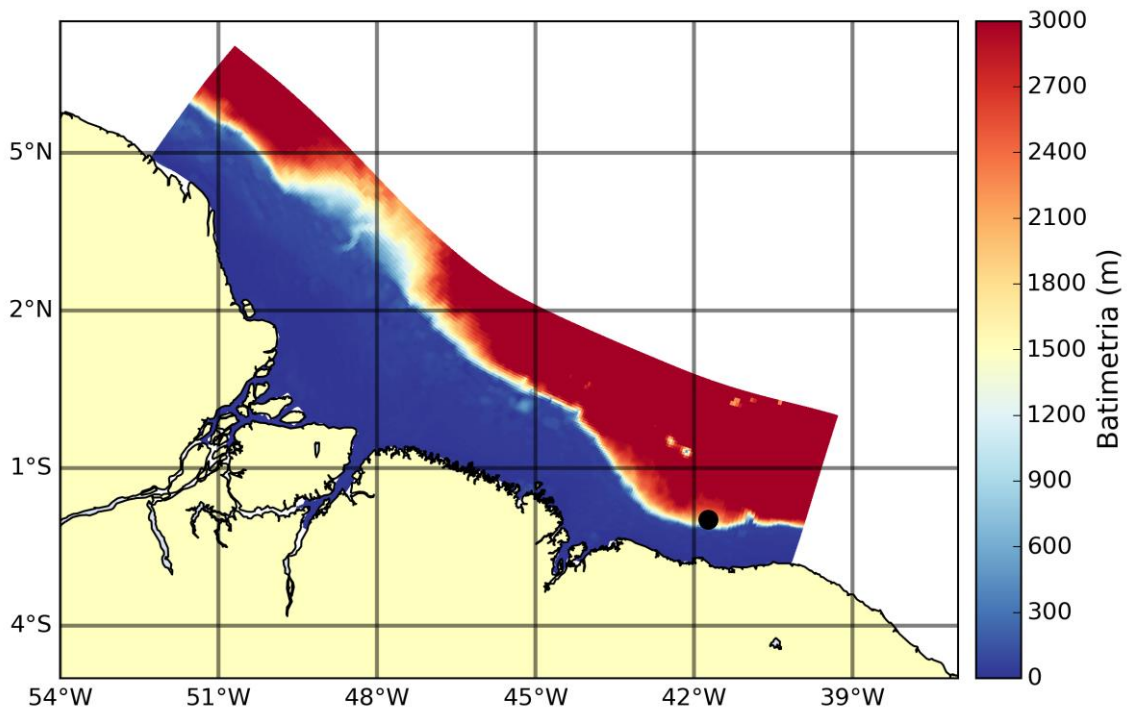


Figura 8 – Batimetria (m) associada à grade numérica do modelo Delft3D.

3.3. Condições Contorno

Como condições de contorno nas fronteiras oceânicas foram utilizados os resultados de temperatura, salinidade e velocidade das correntes do modelo HYCOM em diversos níveis de profundidade. A simulação produzida pelo HYCOM *Consortium* tem resolução espacial de $1/12^\circ$ (aproximadamente 8 km na área de estudo) e temporal de um dia. Esta base hidrodinâmica encontra-se disponível desde o ano de 2004, com diversas implementações e melhorias implementadas até o presente. Os mais recentes experimentos utilizam o sistema NCODA³ (CUMMINGS, 2005), em que é realizada assimilação de dados de altimetria e temperatura da superfície do mar proveniente de dados de satélite, o que aumenta a confiabilidade dos resultados utilizados como forçantes para a modelagem do Delft.

Os resultados do HYCOM são gerados a cada 24 horas e não tem resolução temporal suficiente para representar as oscilações na frequência do sinal de maré. Desta forma, foram utilizadas as constantes harmônicas do modelo TPXO (EGBERT *et al.*, 1994) para gerar o sinal de maré nas fronteiras da grade do Delft.

As forçantes barotrópicas foram impostas nas bordas do modelo hidrodinâmico através da condição de fronteira denominada (invariante) Riemann. A invariante Riemann ($f(t)$) é obtida através da equação:

$$f(t) = U + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (\text{Eq. 3.3-1})$$

considerando tanto a elevação do nível d'água (ζ) quanto à velocidade da corrente (U), além da profundidade (d) e aceleração da gravidade (g). Esse tipo de condição de fronteira simula uma borda levemente reflexiva, na qual perturbações de ondas curtas podem cruzar a fronteira aberta sem que estas sejam refletidas de volta para o domínio.

A fim de implementar de forma coerente a invariante Riemann (que considera a profundidade no seu cálculo), o modelo recebeu uma forçante a cada duas células de grade. Desta forma, não há grande variação da profundidade (ao longo de apenas duas células) e o erro embutido no cálculo da forçante é minimizado. A salinidade e a

³ Navy Coupled Ocean Data Assimilation.

temperatura também foram implementadas a cada duas células da grade numérica. Assim, na configuração final, o modelo considerou 11 bordas na fronteira norte, 31 na fronteira leste, 11 na sul e duas na parte oeste da grade.

Para a reprodução do campo atmosférico foram utilizados dados de vento e pressão provenientes da reanálise CFSv2, descrita a seguir. Para representar o efeito dos rios na hidrodinâmica local, foram utilizadas vazões médias mensais nos contornos das bordas fluviais. A descrição detalhada destas forçantes será apresentada posteriormente.

A troca de calor entre o oceano e a atmosfera foi representada baseando-se nas formulações de Gill (1982) e Lane (1989). Para tal, a temperatura do ar, umidade relativa e cobertura de nuvens foram prescritas utilizando os campos da CFSv2, assim como os dados de vento citados anteriormente. As trocas de massa entre oceano e atmosfera foram desconsideradas, uma vez que através de testes iniciais observou-se que sua influência foi pouco significativa no campo de correntes. Para a condição de contorno no fundo foi utilizado um coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,02.

3.3.1. Correntes (Contorno Oceânico)

Conforme descrito anteriormente, a base hidrodinâmica foi gerada a partir do modelo Delft3D, sendo este alimentado por condições de contorno em suas bordas oceânicas pelo modelo HYCOM. Para comprovar a continuidade dos fluxos no acoplamento entre os modelos, uma avaliação acerca das velocidades foi realizada próximo às fronteiras do domínio espacial simulado pelo Delft3D. A partir desta avaliação pode-se garantir que a dinâmica simulada pelo HYCOM em larga-escala foi transferida adequadamente ao Delft3D.

Séries temporais das correntes foram extraídas para avaliar as condições nas fronteiras oceânicas do domínio simulado pelo Delft3D (leste, norte e oeste), a partir das quais foram gerados *stickplots*, conforme apresentado da Figura 9 à Figura 11. As correntes do Delft3D foram avaliadas a partir de pontos no interior de seu domínio espacial, enquanto as do HYCOM foram analisadas no ponto de grade adjacente mais próximo, porém fora do domínio de simulação do Delft3D. Tanto em intensidade como direção, observa-se uma boa concordância entre os fluxos.

A Figura 9 mostra os *stickplots* das correntes do Delft e HYCOM junto à fronteira leste. É possível observar a concordância entre os modelos nesta fronteira, na qual está representada a Corrente Norte do Brasil. Observa-se, portanto, que o Delft3D representa satisfatoriamente a inserção das condições de corrente a partir da fronteira leste em seu domínio de simulação.

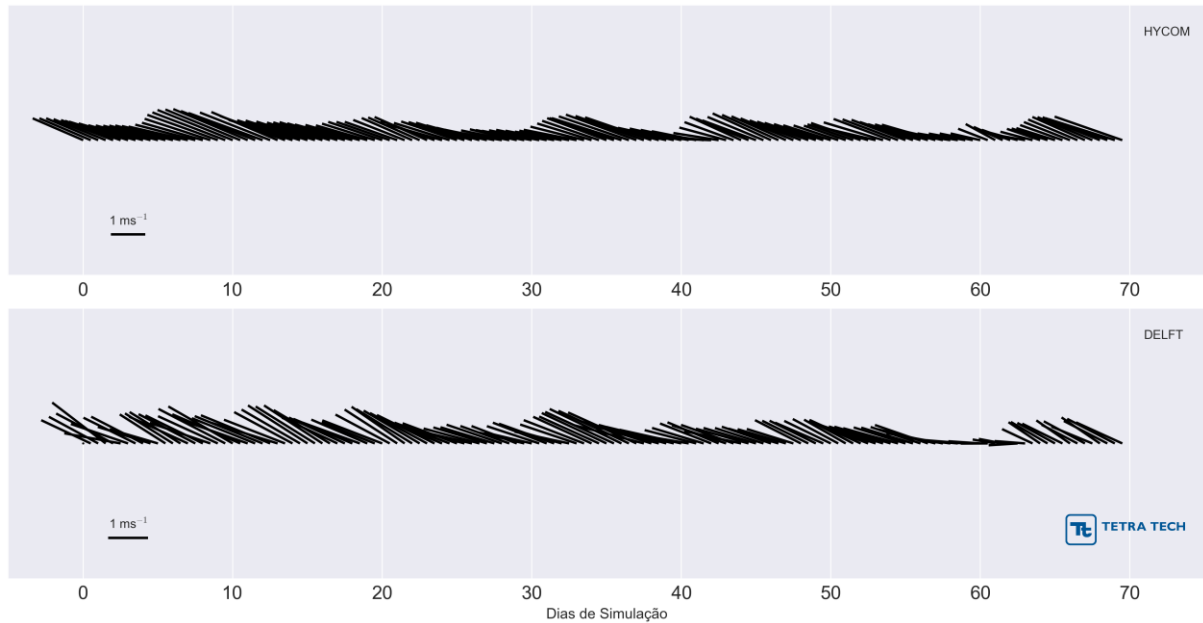


Figura 9 – *Stickplots* das correntes junto à fronteira leste do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (2,0°S e 40,0°W, quadro superior) e Delft3D (1,83°S e 39,92°W, quadro inferior).
Fonte: TETRA TECH.

A Figura 10, analogamente, mostra a concordância entre as bordas junto à fronteira norte do modelo. Também se observa que o Delft3D foi capaz de assimilar de maneira satisfatória as condições de corrente do HYCOM e propaga-las para o interior de seu domínio.

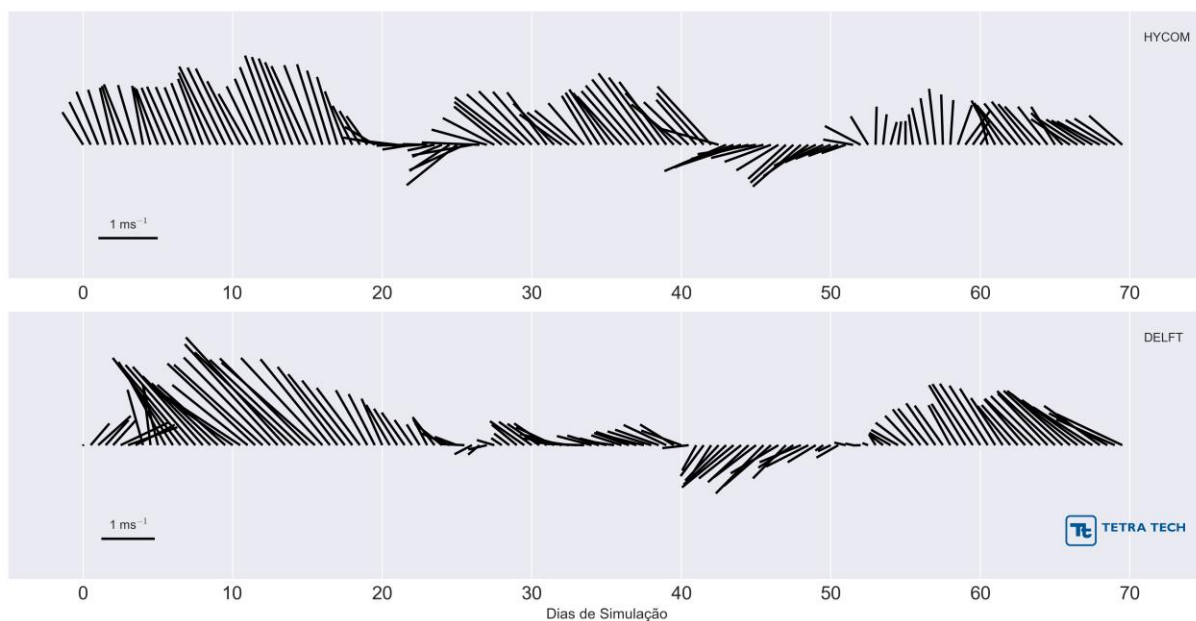


Figura 10 – Stickplots das correntes junto à fronteira norte do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (2,4°N e 45,0°W, quadro superior) e Delft3D (2,35°N e 45,63°W, quadro inferior).
Fonte: TETRA TECH.

A Figura 11 mostra a comparação entre os modelos junto à fronteira oeste do domínio. Observa-se que o Delft3D não segue exatamente o padrão apresentado pelo HYCOM, conforme vinha sendo observado nas demais bordas. Porém, este é um comportamento esperado, uma vez que esta borda está disposta em águas mais rasas, região em que o HYCOM não é capaz de representar adequadamente toda dinâmica existente. Nesta região, o Delft3D calcula todos os fluxos existentes e tem uma resultante junto à borda oeste que inclui fatores como correntes costeiras e de maré. Isto justifica a diferença entre as velocidades na borda observada nos dois modelos.

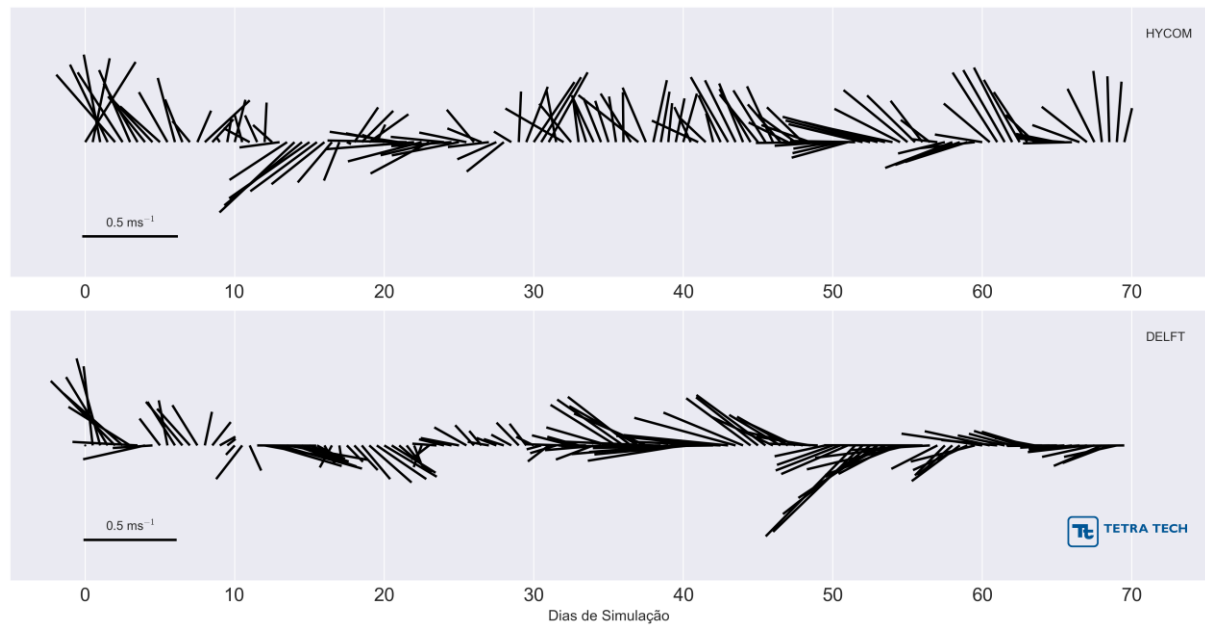


Figura 11 – Stickplots das correntes junto à fronteira oeste do domínio simulado, comparativo entre HYCOM (5,5°N e 52,0°W, quadro superior) e Delft3D (5,54°N e 51,75°W, quadro inferior).
Fonte: TETRA TECH.

3.3.2. Vento (Contorno Atmosférico)

A condição de contorno de superfície adotada na modelagem numérica do Delft3D utilizou campos de vento e pressão oriundos da reanálise CFSv2 (*Climate Forecast System Reanalysis Version 2*; SAHA *et. al*, 2014).

A CFSv2 é um conjunto de assimilação de dados, gerada pelo centro norte-americano NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), e constitui uma sólida base de dados climatológicos com cobertura global. A CFSv2 dá continuidade ao produto CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) a partir de janeiro de 2011 até o presente, porém incorporando avanços nos processos de assimilação e interpolação de dados. O embasamento físico da CFSR e CFSv2 difere de outros produtos de reanálise pelo acoplamento entre o oceano e a atmosfera, por ter um modelo interativo de gelo marinho e também por assimilar dados de satélites através de um esquema de interpolação estatística. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo assim seus efeitos sobre o sistema climático terrestre. A resolução espacial fornecida pela CFSv2 é de 0,2° e temporal horária.

Para exemplificar as variações espaciais e temporais do vento ao nível de 10 m, são apresentados os campos de velocidade para as quatro estações do ano (Figura 12 à Figura 15). A dinâmica atmosférica apresenta oscilações sazonais que variam de acordo com a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Assim, os períodos de verão e outono (referentes ao primeiro período da simulação hidrodinâmica) são caracterizados por ventos predominantes do quadrante de NE, enquanto o inverno e primavera (referentes ao segundo período) por ventos de E.

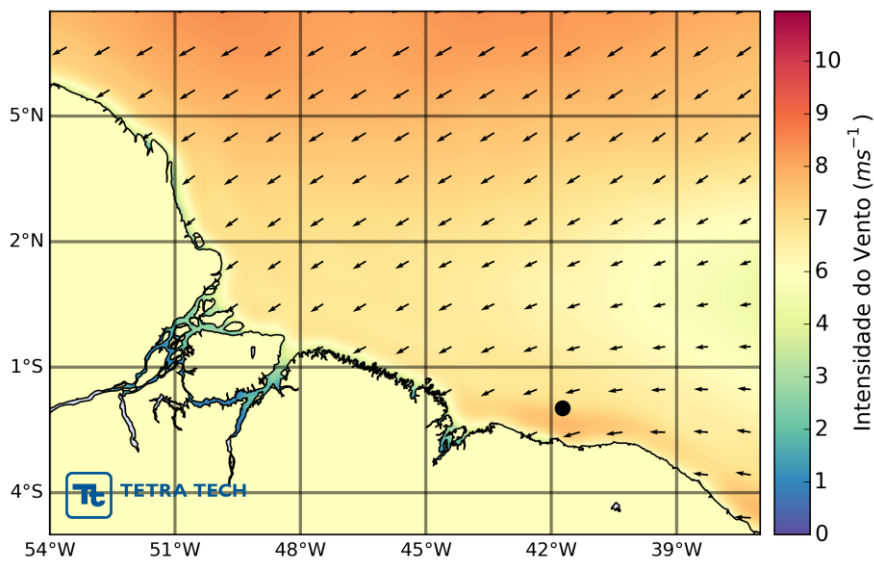


Figura 12 – Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o verão (janeiro a março), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.

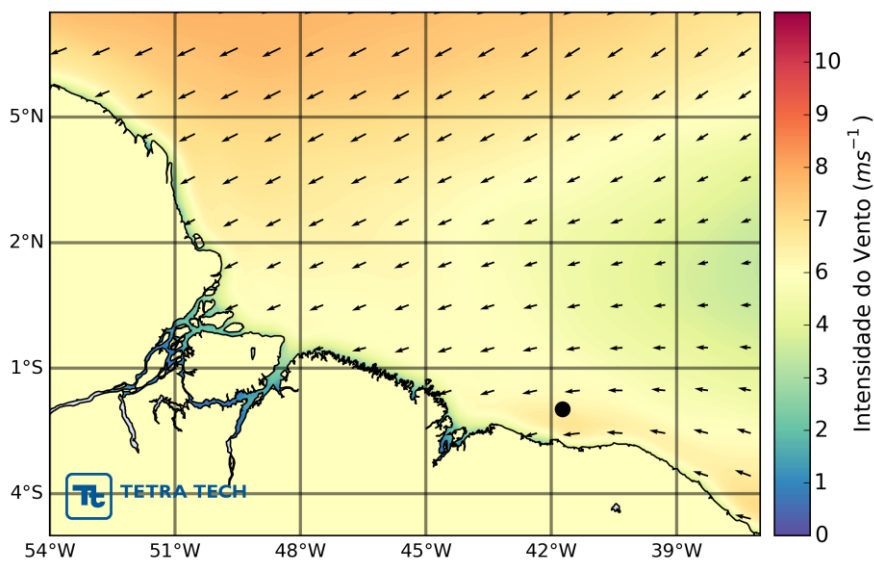


Figura 13 – Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o outono (abril a junho), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.

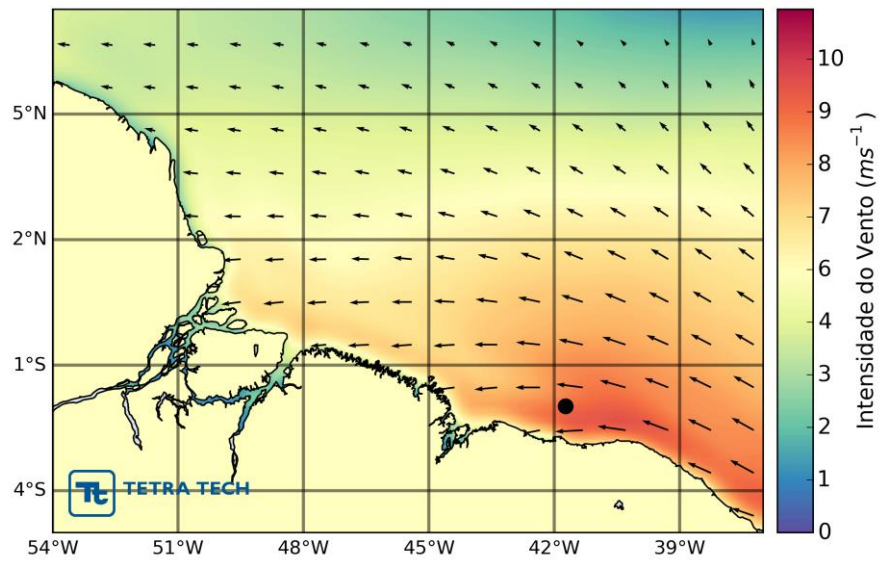


Figura 14 - Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para o inverno (julho a setembro), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.

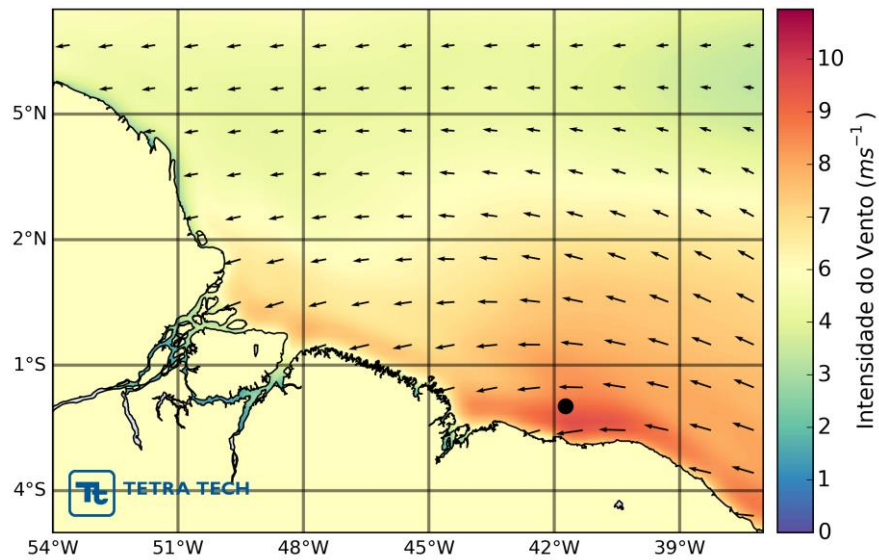


Figura 15 - Mapa de direção e intensidade do vento médio a 10 m para a primavera (outubro a dezembro), obtido a partir da reanálise CFSv2. Fonte: TETRA TECH.

A seguir, é apresentada uma análise das condições de vento representativas para a região dos blocos exploratórios na Bacia de Barreirinhas, a partir de uma série temporal de vento extraída do elemento de grade centrado nas coordenadas 1,3°N e 42,4°W. A análise foi realizada para os períodos sazonais de verão (janeiro, fevereiro e março), outono (abril, maio e junho), inverno (julho, agosto e setembro) e primavera (outubro, novembro e dezembro) de 2014. A Figura 16 apresenta os histogramas direcionais sazonais do vento, onde a direção refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica, a intensidade (m/s) é dada pela distância radial e a escala de cores representa a frequência de observações (%). Observa-se entre o verão e o outono ventos mais frequentes vindos de ENE, enquanto no inverno e primavera a direção mais frequente dos ventos é de ESE.

A Tabela 4 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções dos ventos durante o verão de 2014. Neste período observam-se os ventos mais frequentes vindos de ENE (50,0%) e E (37,4%), com intensidade médias de 5,7 m/s e 6,5 m/s e máxima de 9,0 m/s, respectivamente em cada uma destas direções.

A distribuição conjunta de intensidades e direções dos ventos durante o outono de 2014 é mostrada na Tabela 5. Os ventos mais frequentes neste período foram de ENE (41,4%) e E (21,5%), com intensidades médias de 5,0 m/s e 5,5 m/s e máximas de 8,7 m/s e 10,3 m/s, respectivamente em cada uma destas direções.

Para o inverno de 2014, a distribuição conjunta de intensidades e direções dos ventos é exibida na Tabela 6. Os ventos mais frequentes neste período foram de ESE (62,2%) e SE (30,7%), com intensidades médias de 7,4 m/s e 6,5 m/s e máximas de 10,5 m/s e 8,9 m/s, respectivamente em cada uma destas direções.

Finalmente, a Tabela 7 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções dos ventos durante a primavera de 2014. Os ventos mais frequentes neste período foram de ESE (69,5%) e E (14,5%), com intensidades médias de 7,1 m/s e 7,3 m/s e máximas de 10,1 m/s e 11,3 m/s, respectivamente em cada uma destas direções.

Conforme mencionado anteriormente, o padrão de circulação dos ventos é dominado pelo posicionamento da ZCIT que, nos períodos de verão e outono está localizada mais ao sul, e nos períodos de inverno e primavera se desloca para norte. As estações de inverno e primavera trazem os ventos mais intensos para a região.

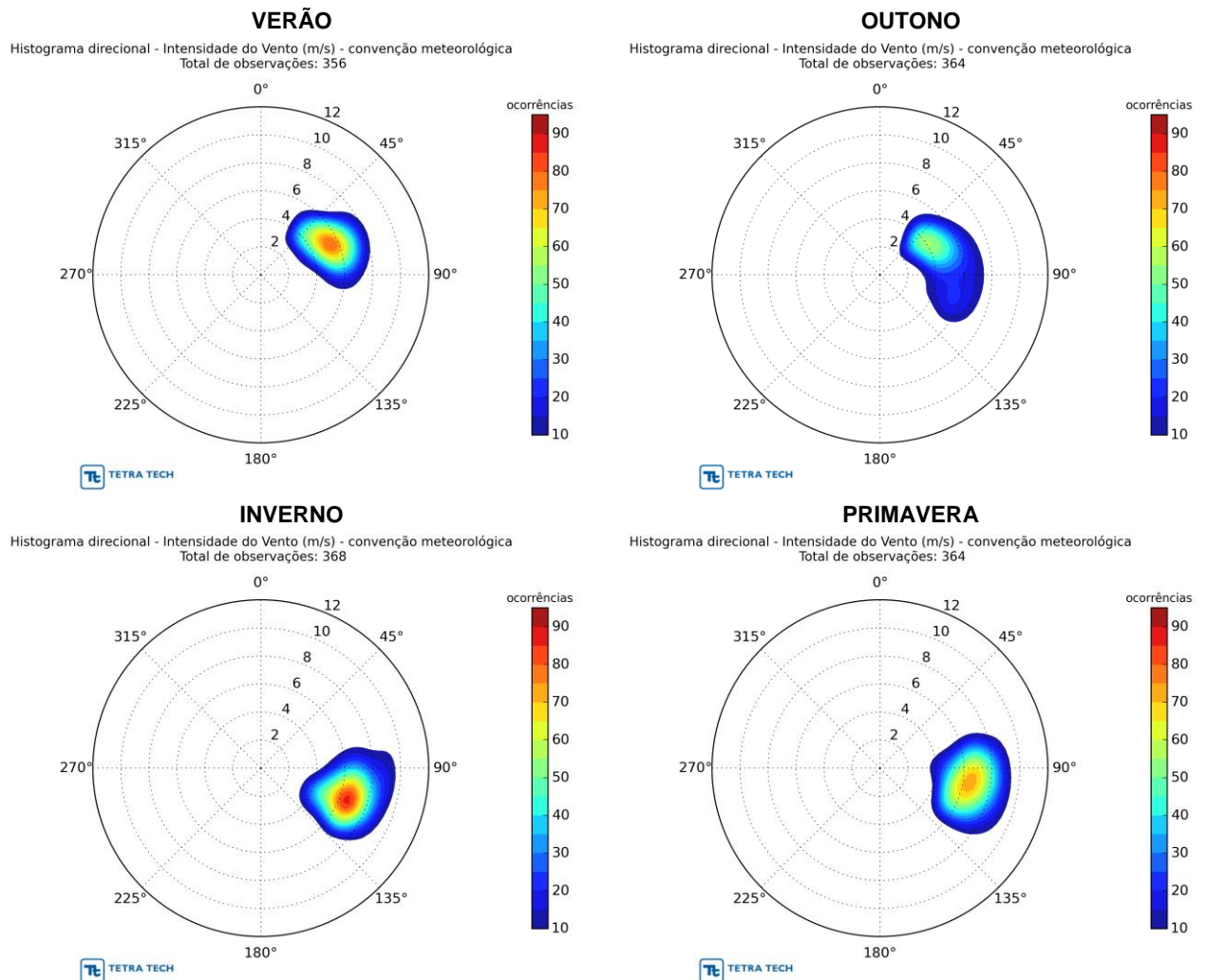


Figura 16 – Histograma direcional de vento (CFSv2) para os períodos de verão (superior esquerdo), outono (superior direito), inverno (inferior esquerdo) e primavera (inferior direito) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica para direção.
Fonte: TETRA TECH.

Tabela 4 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de verão (janeiro, fevereiro e março) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	(%)
0,0-2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2,0-4,0	0	0	10	6	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	5,9
4,0-6,0	0	0	10	106	39	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	164	46,1
6,0-8,0	0	0	0	63	78	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156	43,8
8,0-10,0	0	0	0	3	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	4,2
Total	0	0	20	178	133	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	356	
(%)	0,0	0,0	5,6	50,0	37,4	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Média	0,0	0,0	3,9	5,7	6,5	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Máximo	0,0	0,0	5,4	9,0	9,0	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

Tabela 5 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de outono (abril, maio e junho) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	(%)
0,0-2,0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	1,1
2,0-4,0	0	0	10	26	13	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	16,9
4,0-6,0	0	0	22	91	38	24	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187	51,7
6,0-8,0	0	0	0	30	21	38	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97	26,8
8,0-10,0	0	0	0	1	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	3,6
Total	0	0	32	150	78	73	28	0	0	0	1	0	0	0	0	0	362	
(%)	0,0	0,0	8,8	41,4	21,5	20,2	7,7	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Média	0,0	0,0	4,3	5,0	5,5	6,2	5,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Máximo	0,0	0,0	5,8	8,7	10,3	9,2	10,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

Tabela 6 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de inverno (julho, agosto e setembro) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	(%)
0,0-2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2,0-4,0	0	0	0	2	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1,7
4,0-6,0	0	0	0	1	6	36	36	3	0	0	0	0	0	0	0	0	82	22,7
6,0-8,0	0	0	0	0	10	116	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187	51,7
8,0-10,0	0	0	0	0	0	73	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	24,0
Total	0	0	0	3	18	225	111	5	0	0	0	0	0	0	0	0	362	
(%)	0,0	0,0	0,0	0,8	5,0	62,2	30,7	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Média	0,0	0,0	0,0	3,8	6,3	7,4	6,5	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Máximo	0,0	0,0	0,0	4,8	10,5	10,5	8,9	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

Tabela 7 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento (CFSv2) para o período de primavera (outubro, novembro e dezembro) de 2014, com intervalo de amostragem horária e seguindo a convenção meteorológica.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	(%)
0,0-2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2,0-4,0	0	0	0	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1,9
4,0-6,0	0	0	0	3	10	39	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	17,5
6,0-8,0	0	0	0	2	30	137	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196	54,6
8,0-10,0	0	0	0	0	11	71	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	25,9
Total	0	0	0	9	52	249	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	359	
(%)	0,0	0,0	0,0	2,5	14,5	69,4	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Média	0,0	0,0	0,0	4,8	7,1	7,3	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Máximo	0,0	0,0	0,0	6,8	11,1	10,1	9,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

3.3.3. Vazão (Contorno Continental)

Para a vazão dos rios que deságuam nas regiões estuarinas, foram utilizadas vazões médias mensais calculadas com base nas estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional das Águas). Esta base foi complementada com dados obtidos na bibliografia, para regiões onde não havia dados fluviométricos.

As vazões dos principais rios foram inseridas no modelo numérico a partir de 3 subdivisões do domínio. Estas subdivisões foram realizadas em 3 grandes fronteiras, denominadas norte (verde), central (amarelo) e sul (vermelho), conforme apresentado na Figura 17, de forma que as condições foram inseridas no modelo a partir de cada uma delas.

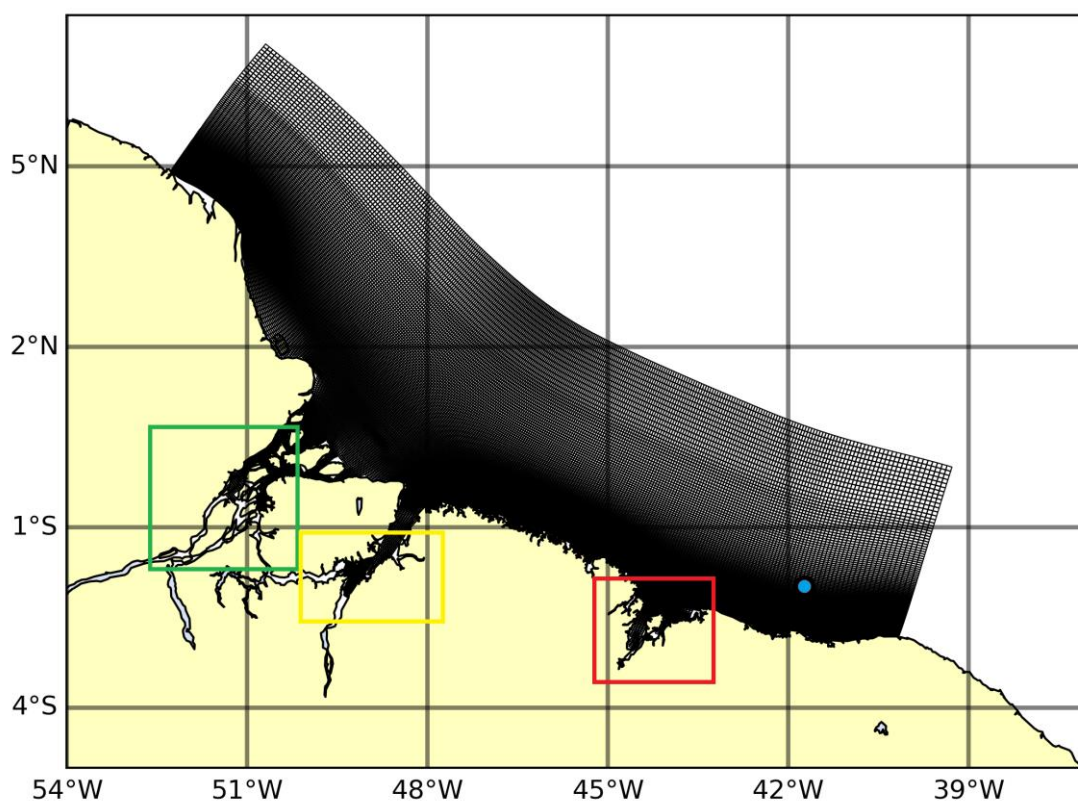


Figura 17 - Subdivisão das regiões de inserção das vazões dos principais rios da região de estudo.

Na fronteira norte (verde, Figura 17) foi inserida a vazão do rio Amazonas, obtida através dos dados da estação fluviométrica da ANA⁴ em Manaus (estação 14990000). Foram calculadas as médias climatológicas mensais a partir dos dados entre 1927 e 1998, como apresentado na Figura 18.

O rio Amazonas apresenta uma vazão média de 168562 m³/s, com um ciclo sazonal bem definido entre a estação da cheia, de março a agosto, e de seca, entre setembro e fevereiro. A máxima vazão ocorre entre maio e junho (228610 m³/s) e a mínima ocorre em novembro (112080 m³/s). Tanto os valores de vazão quanto os períodos sazonais estão de acordo com aqueles observados por Beardsley (1995).

⁴ ANA – Agência Nacional de Águas <<http://www.ana.gov.br/>>

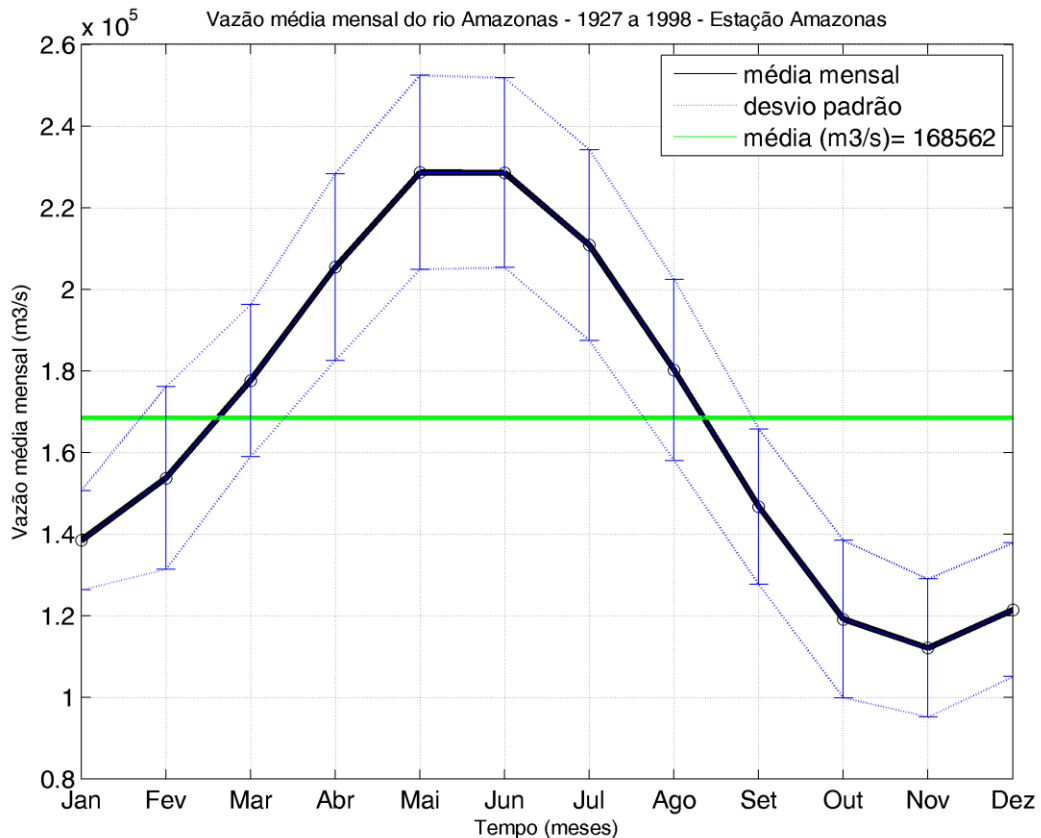


Figura 18 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m^3/s) do rio Amazonas.

Na região da fronteira central (amarelo; Figura 17) foram inseridas as vazões de três rios: Rio Amazonas, Rio Capim e Rio Guama. Segundo De Souza (2006) cerca de 5% da vazão do rio Amazonas segue pelo canal sul do rio, desaguando assim na região central, determinada pelo retângulo amarelo. Esta porcentagem foi utilizada para o cálculo da contribuição da vazão do Rio Amazonas inserida no modelo pela fronteira central.

A Figura 19 apresenta as médias climatológicas mensais para as vazões do Rio Capim calculadas a partir dos dados da ANA para a estação fluviométrica Badajós (estação 31700000). A vazão média é de 582 m^3/s , com máxima de 993 m^3/s em maio e mínima de 322 m^3/s no mês de novembro. A sazonalidade é similar à do Rio Amazonas, porém com o período de cheia entre fevereiro e junho e de seca entre julho e dezembro.

Analogamente, a Figura 20 mostra o ciclo sazonal da vazão para o Rio Guama, calculada a partir da estação fluviométrica Vila Capoeira (estação 31490000), que cobre o período entre 1977 e 2007. O máximo mensal ocorre no mês de abril, com 194 m³/s. O mínimo, por sua vez, é registrado em novembro, com 25 m³/s. A vazão média observada foi de 85 m³/s. O ciclo sazonal das vazões é bastante similar ao do Rio Capim, com a estação de cheia ocorrendo entre fevereiro e junho e de seca entre julho e dezembro.

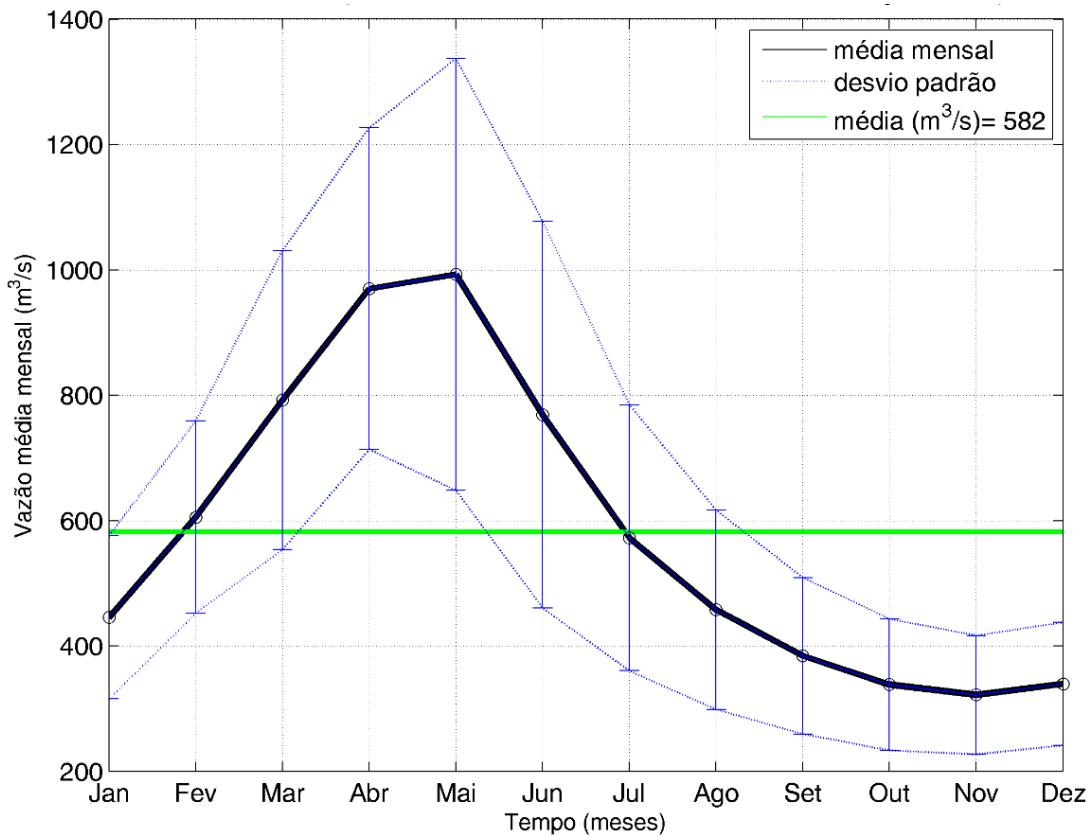


Figura 19 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m³/s) do Rio Capim.

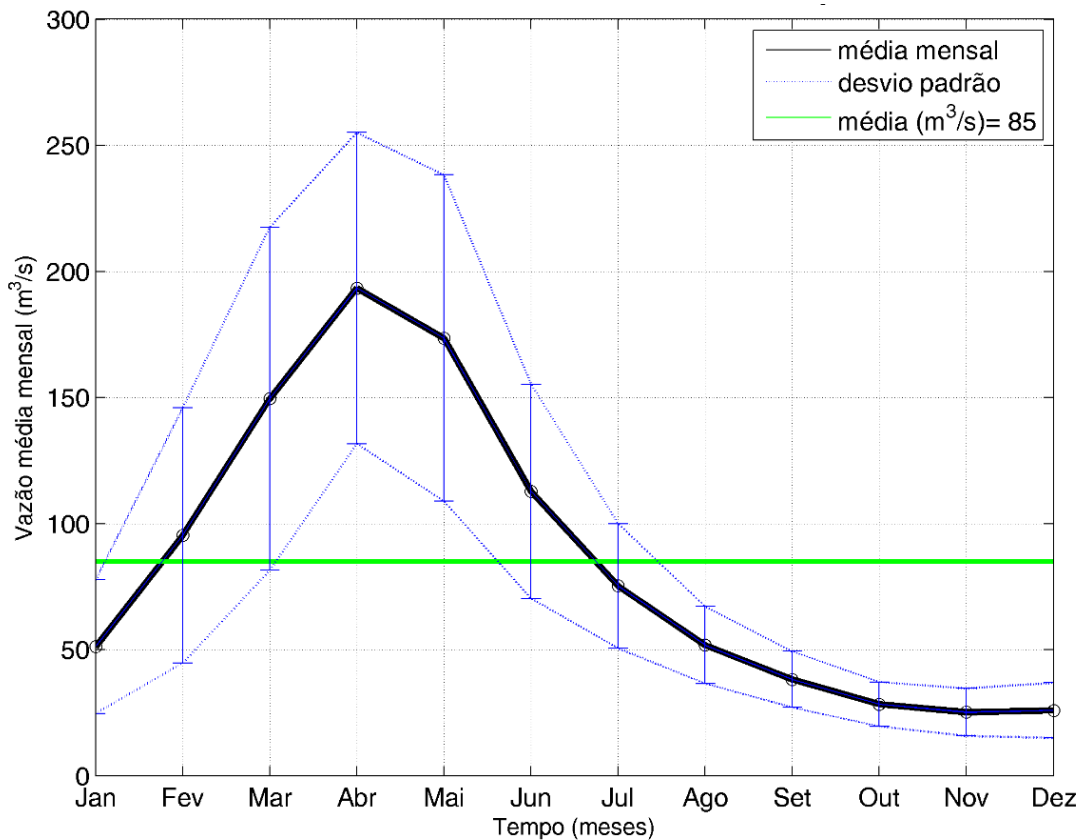


Figura 20 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m^3/s) do Rio Guama.

A vazão inserida na fronteira sul (vermelho; Figura 17) é composta pelas informações obtidas de diversos rios. Fazem parte dessa subdivisão os rios Grajau, Bacabal, Cantanhede, Nina Rodrigues e Pindaré.

A Figura 21 mostra as médias climatológicas mensais para o rio Grajaú, calculadas com base nos dados obtidos junto à ANA para a estação fluviométrica Aratói Grande (estação 33380000). A vazão média nesta estação é de $100 m^3/s$, com máxima em abril ($372 m^3/s$) e mínima em outubro ($5 m^3/s$). O período de cheia ocorre de fevereiro a junho, enquanto a seca se dá em julho e agosto.

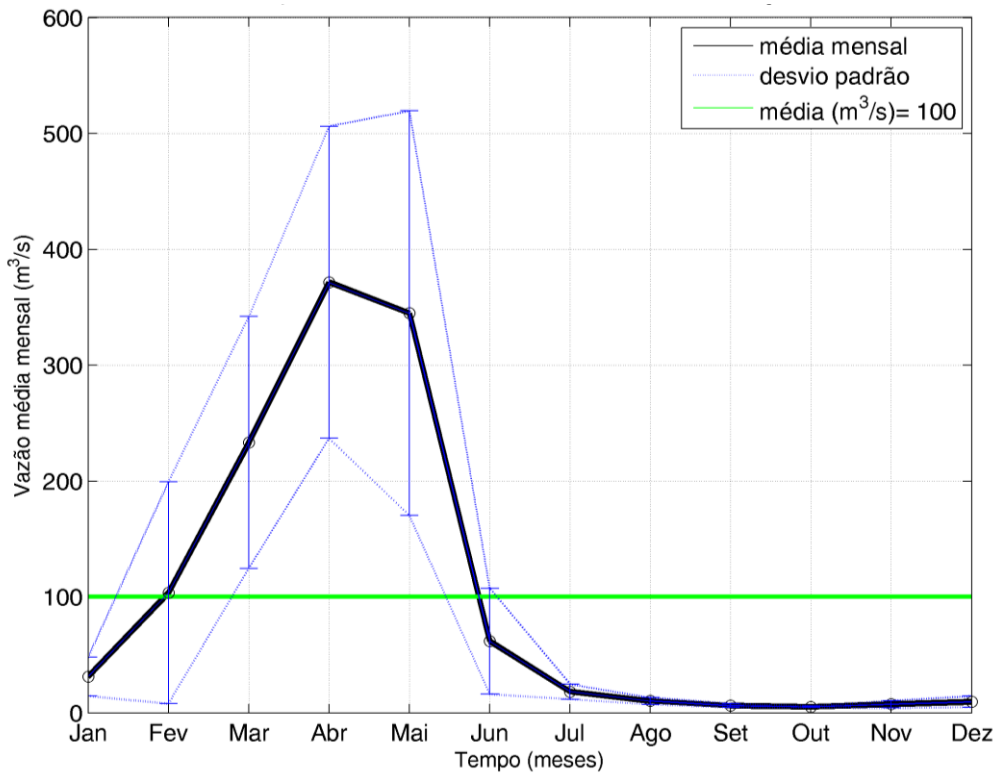


Figura 21 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m³/s) do Rio Grajaú.

As médias climatológicas mensais para as vazões do Rio Mearim são apresentadas na Figura 22. Os valores foram calculados a partir dos dados da ANA para a estação fluviométrica de Bacabal (estação 33290000). A vazão média é de 93 m³/s, com máxima ocorrendo entre maio e junho (237 m³/s) e mínima em setembro (45 m³/s). A variação sazonal é a mesma observada para o rio Grajaú.

A Figura 23 mostra o ciclo sazonal das vazões calculadas para o Rio Itapecuru a partir dos dados para a estação Cantanhede da ANA (estação 33680000). A vazão média nesta estação é de 192 m³/s, enquanto a máxima e mínima variam entre 38 m³/s (setembro) e 799 m³/s (abril), respectivamente. O período sazonal de seca e cheia é semelhante ao observado anteriormente para os demais rios.

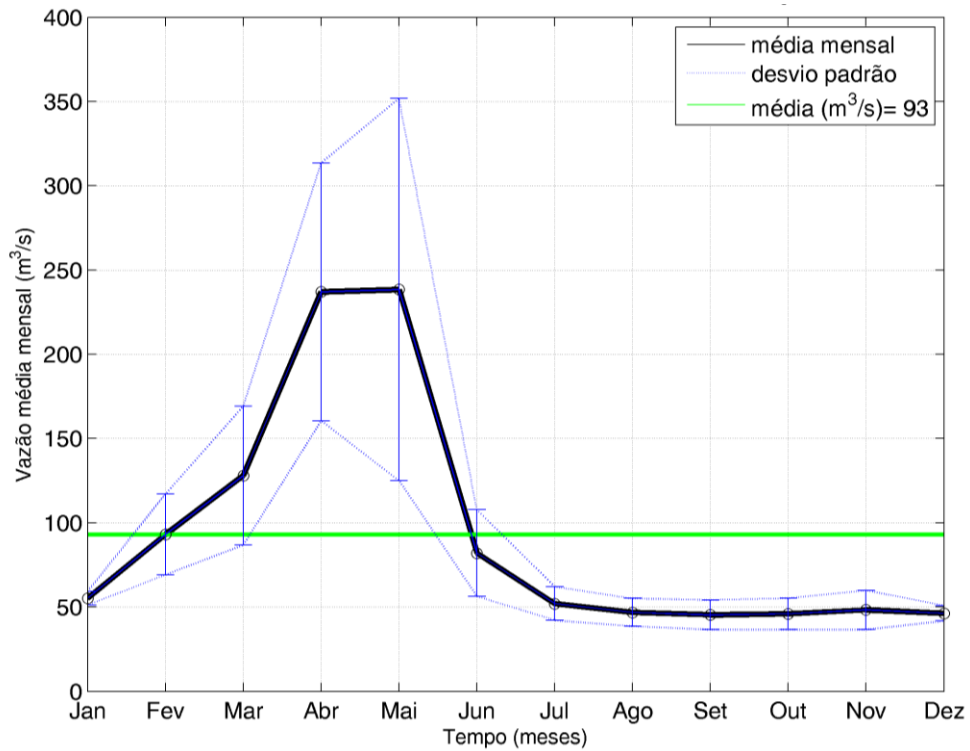


Figura 22 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m³/s) do Rio Mearim.

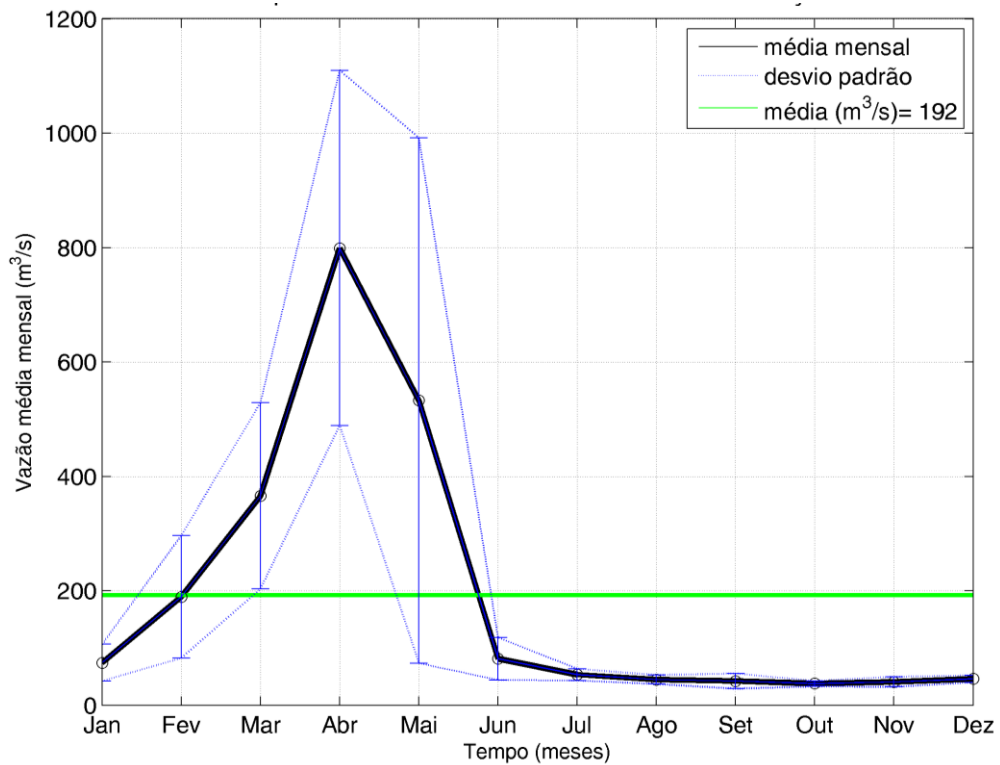


Figura 23 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m³/s) do Rio Itapecuru.

Os valores médios mensais de vazão do Rio Munim, obtidos na estação Nina Rodrigues da ANA (estação 33780000), são apresentadas na Figura 24. A vazão média do rio é de 64 m³/s, com máxima de 262 m³/s em maio e mínima de 5 m³/s em novembro. A variação sazonal entre cheia e seca é similar àquela descrita para os três rios anteriores.

O último rio incluído na fronteira central é o Rio Pindaré, que apresenta valores maiores se comparado às vazões dos demais rios, exceto para o Rio Itapecuru. Os dados da estação da Pindaré-Mirim da ANA (estação 33190000) foram utilizados para calcular as médias mensais apresentadas na Figura 25. A vazão média é de 210 m³/s, a vazão máxima de 653 m³/s ocorre em maio e a mínima de 35 m³/s em outubro.

Por fim, a Tabela 8 contém um resumo de todas as vazões utilizadas para a modelagem numérica da região.

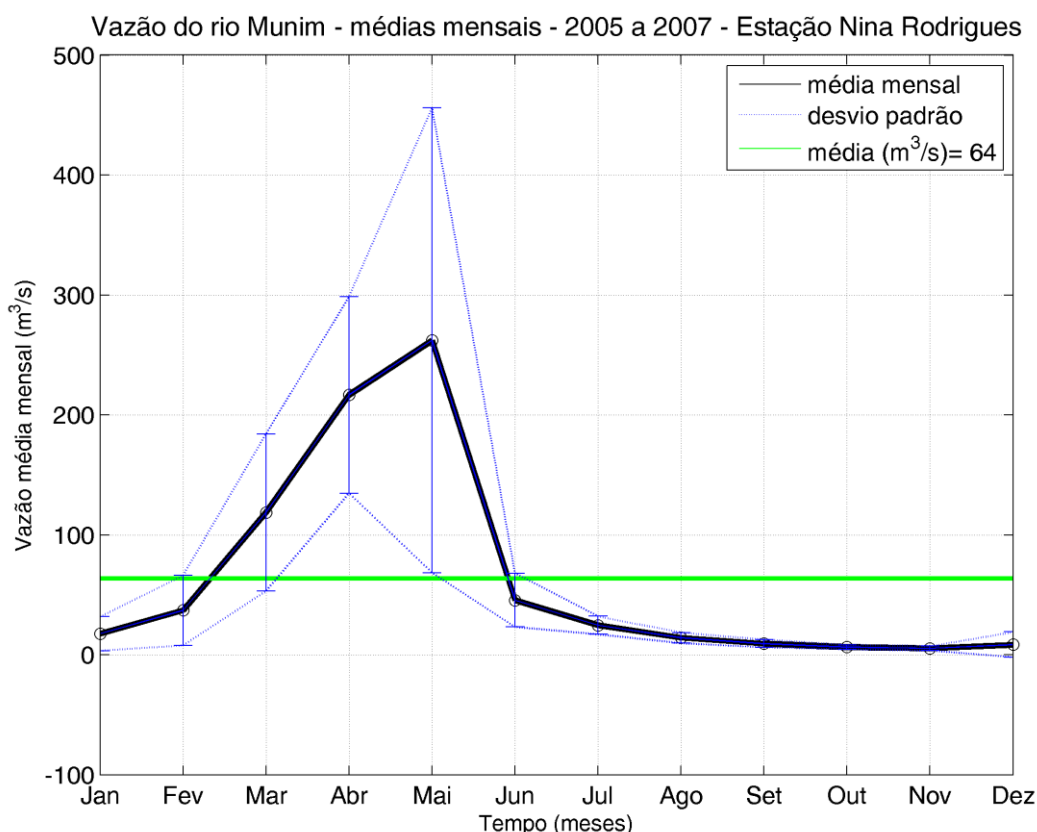


Figura 24 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m³/s) do Rio Munim.

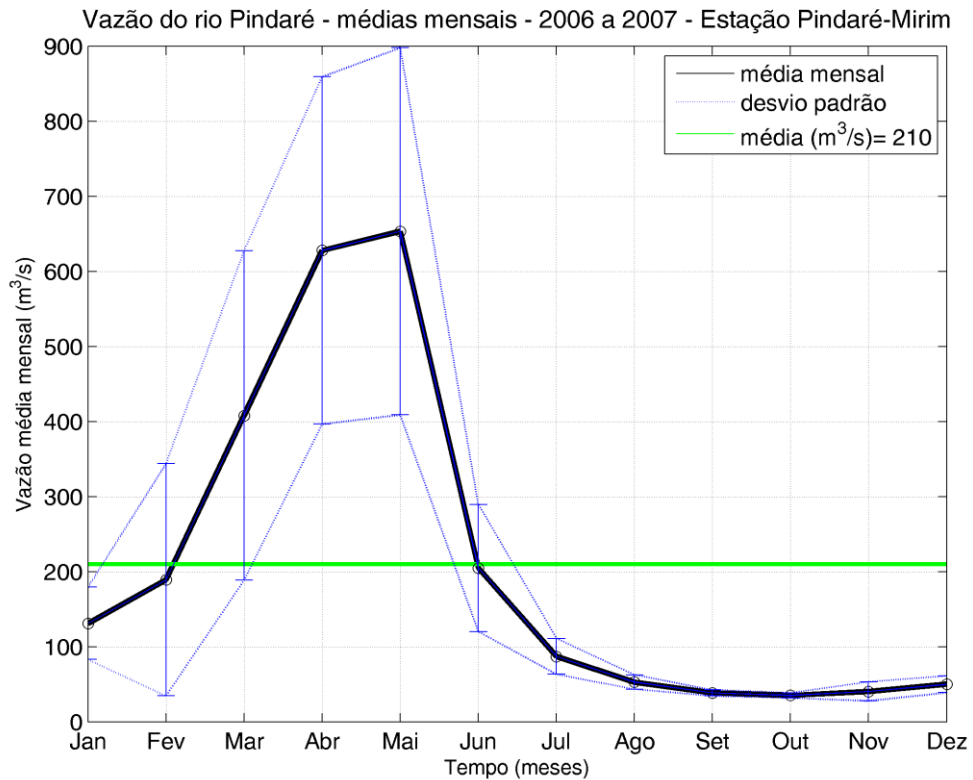


Figura 25 – Ciclo sazonal da vazão média mensal (m^3/s) do Rio Pindaré.

Tabela 8 – Tabela resumo das vazões inseridas no modelo (m^3/s).

FRONTEIRA	NORTE	CENTRAL				SUL					
RIO	Amazonas	Amazonas	Capim	Guama	Total	Grajaú	Mearim	Itapecuru	Munin	Pindaré	Total
ESTAÇÃO ANA	Manaus	Manaus	Badajos	Vila Capoeira		Aratoi	Bacabal	Cantanhede	Nina Rodrigues	Mirim	
Janeiro	138440	6922	445	51	7419	31	55	74	18	131	309
Fevereiro	153720	7686	606	95	8387	104	93	189	37	189	612
Março	177610	8881	792	150	9822	233	128	366	119	408	1254
Abril	205430	10272	970	51	11293	372	237	799	217	628	2252
Mai	228640	11432	993	95	12520	345	238	533	262	653	2032
Junho	228580	11429	769	150	12348	62	82	81	46	205	475
Julho	210800	10540	572	75	11188	18	52	53	25	87	235
Agosto	180210	9011	458	52	9520	10	47	45	14	53	169
Setembro	146680	7334	384	38	7757	6	45	42	9	38	142
Outubro	119120	5956	338	28	6323	5	46	38	7	35	131
Novembro	112080	5604	322	25	5951	7	48	41	5	40	142
Dezembro	121430	6072	340	26	6437	10	46	46	9	50	161

3.4. Condições Iniciais

A simulação numérica foi inicializada com nível médio igual a zero e correntes nulas. Já para a inicialização de temperatura e salinidade foram utilizados resultados do modelo HYCOM, interpolados para a grade do modelo, a fim de diminuir o tempo necessário para aquecimento da simulação. Os campos iniciais de temperatura e salinidade superficiais utilizados para as simulações dos períodos representativos de verão e inverno são apresentados na Figura 26 e na Figura 27.

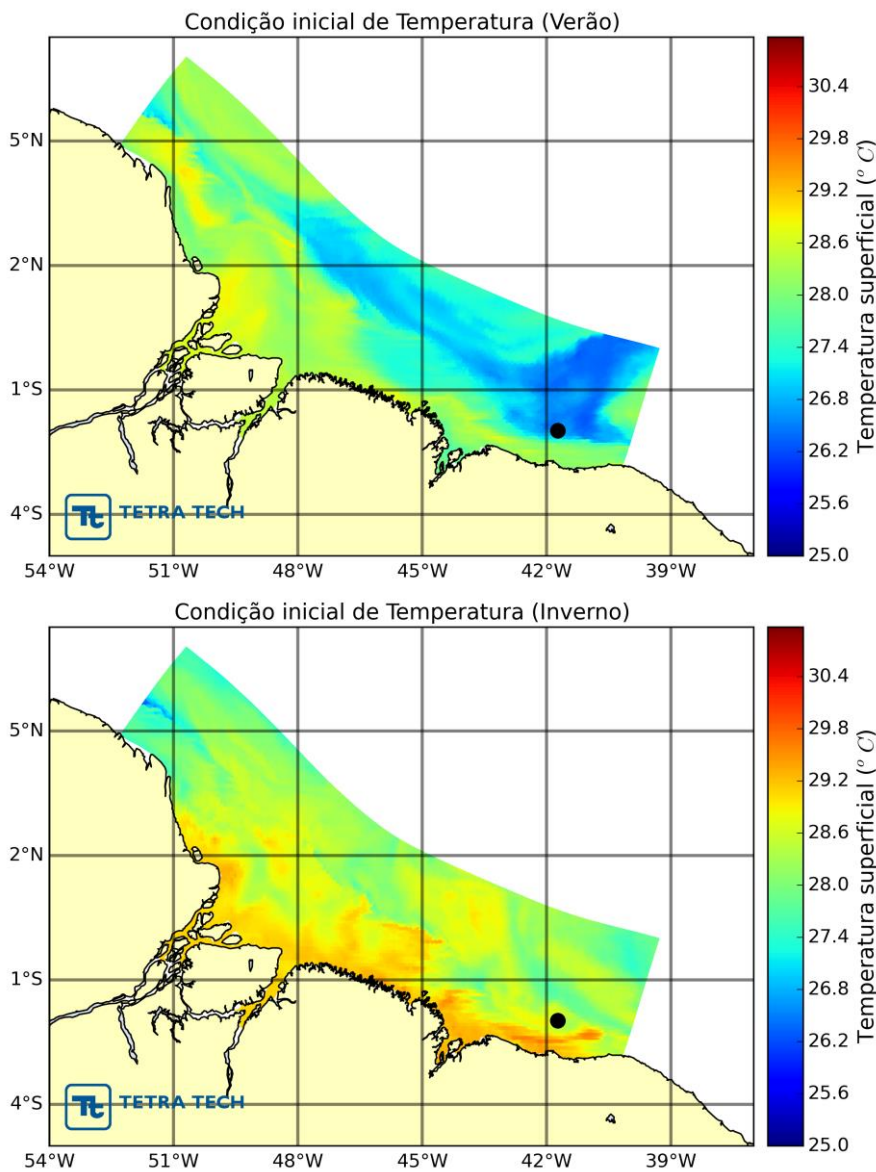


Figura 26 – Campo de temperatura na camada superficial, utilizado como condição inicial da modelagem hidrodinâmica para os períodos representativos do verão (quadro superior) e inverno (quadro inferior) do Hemisfério Sul.

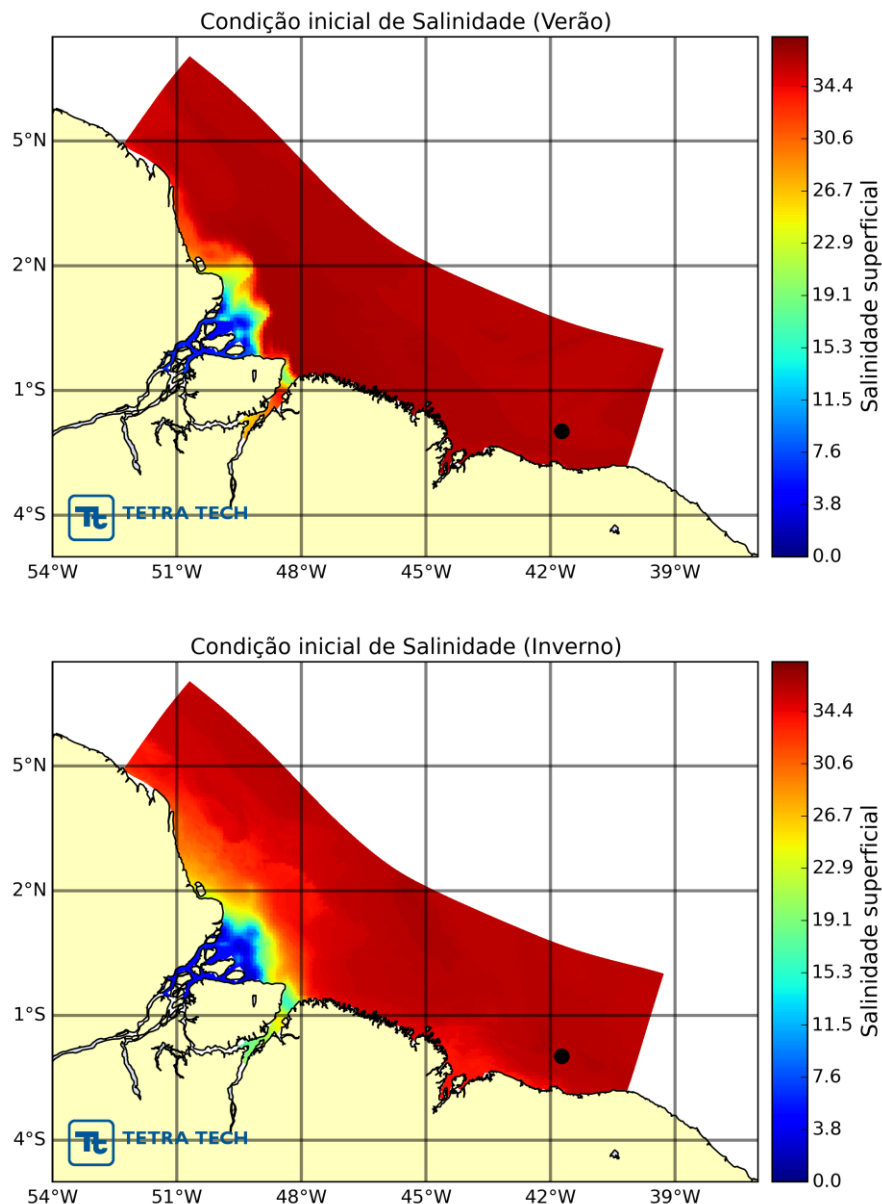


Figura 27 – Campo de salinidade na camada superficial, utilizado como condição inicial da modelagem hidrodinâmica para os períodos representativos de verão (quadro superior) e inverno (quadro inferior) do Hemisfério Sul.

Uma análise acerca do período de aquecimento e estabilização do modelo numérico foi realizada. O período de aquecimento do modelo é definido como o tempo necessário para que o modelo atinja o equilíbrio dinâmico. É importante determinar este período para saber a partir de que instante o modelo está estável e, portanto, produzindo resultados confiáveis. Uma das formas de determinar o período de aquecimento é através da energia cinética, calculada para todo o domínio simulado. No período de

aquecimento a energia cinética sofre uma oscilação, com um aumento inicial e diminuindo em seguida, seguidos pela estabilização em valores próximos a zero. A Figura 28 mostra a série temporal da energia cinética integrada em todo o domínio simulado, assinalando em vermelho a linha corresponde a duas vezes o desvio-padrão da série, que indica o valor limite acima do qual o modelo ainda não atingiu a estabilidade. A partir desta análise, foi considerado um período de 15 dias como período satisfatório para aquecimento do modelo.

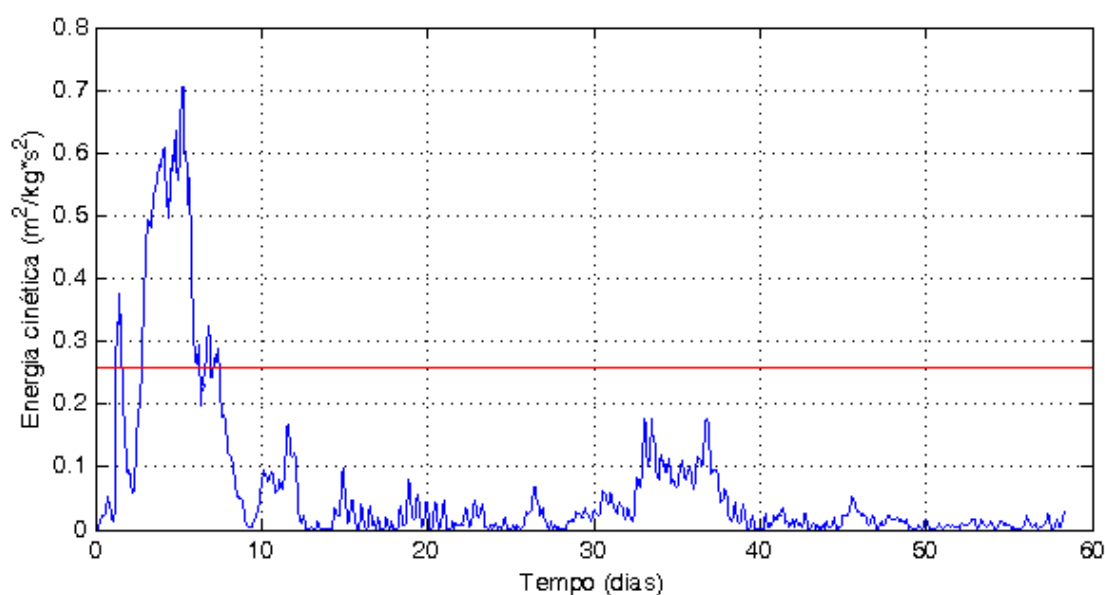


Figura 28 – Série temporal da energia cinética por unidade de massa, integrada em todo o domínio simulado. A linha vermelha indica o valor referente a duas vezes o desvio-padrão da série.

4. AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de validação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica e padrões oceânicos na região em estudo. Com este intuito, são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e dados coletados, disponíveis na região de interesse (região descrita no Capítulo 2).

Os resultados numéricos obtidos foram comparados a diversas bases de dados observacionais. Nestas comparações, os resultados da modelagem numérica foram avaliados quanto à sua capacidade de reproduzir as correntes, nível, temperatura e salinidade na área de estudo. Comparações realizadas entre os resultados da modelagem hidrodinâmica e os dados observacionais, assim como discussões sobre a acurácia e representatividade destes resultados, são apresentados a seguir neste capítulo.

A não concordância entre o período da simulação numérica (que foi realizada para o ano de 2014) e os períodos de disponibilidade de dados de corrente (que possuem datas distintas), impossibilitou a comparação direta entre séries temporais dos mesmos. Desta forma, a comparação entre os resultados da modelagem e os dados de corrente foi realizada através de histogramas direcionais. Foram realizadas comparações a partir de dados coletados por fundeio, referentes ao projeto WOCE (*Word Ocean Circulation Experiment*).

Para validação da elevação da superfície do mar foram utilizadas previsões harmônicas das estações da FEMAR (Fundação de Estudos do Mar) para o ano de 2014. Além disso, foram realizadas comparações de temperatura e salinidade através de dados obtidos por satélite como também da climatologia do NODC.

4.1. Dados utilizados

Com o objetivo de fornecer subsídios à avaliação do modelo hidrodinâmico, foi realizado o levantamento e análise das informações existentes nas imediações da Bacia de Barreirinhas. A Tabela 9 apresenta a listagem das bases de dados utilizadas no processo de avaliação e a Figura 29 mostra a localização dos pontos de coleta e ou análise dos dados observados, sendo que as coordenadas específicas dos pontos de análise e período de disponibilidade dos dados são apresentadas em cada seção de avaliação do respectivo parâmetro (item 4.2 ao 4.5). Os dados disponíveis na forma de campos com distribuição espacial foram obtidos no domínio equivalente à área apresentada na Figura 29 e avaliados quanto à sua distribuição espacial e/ou em pontos específicos de análise.

Tabela 9 - Informações das bases de dados oceanográficos utilizados no processo de validação.

PARÂMETRO	BASE DE DADOS	DESCRIÇÃO
Corrente	Word Ocean Circulation Experiment (WOCE)	Fundeios K327, K328, K340 e K361
	Derivadores LUMPKIN & GARRAFFO	Climatologia
Elevação	FEMAR	Estações Porto de Luiz Correia e Plataforma JP-15
Temperatura	OISST	Produto de satélite
	NODC	Climatologia
Salinidade	SMOS	Produto de satélite
	NODC	Climatologia

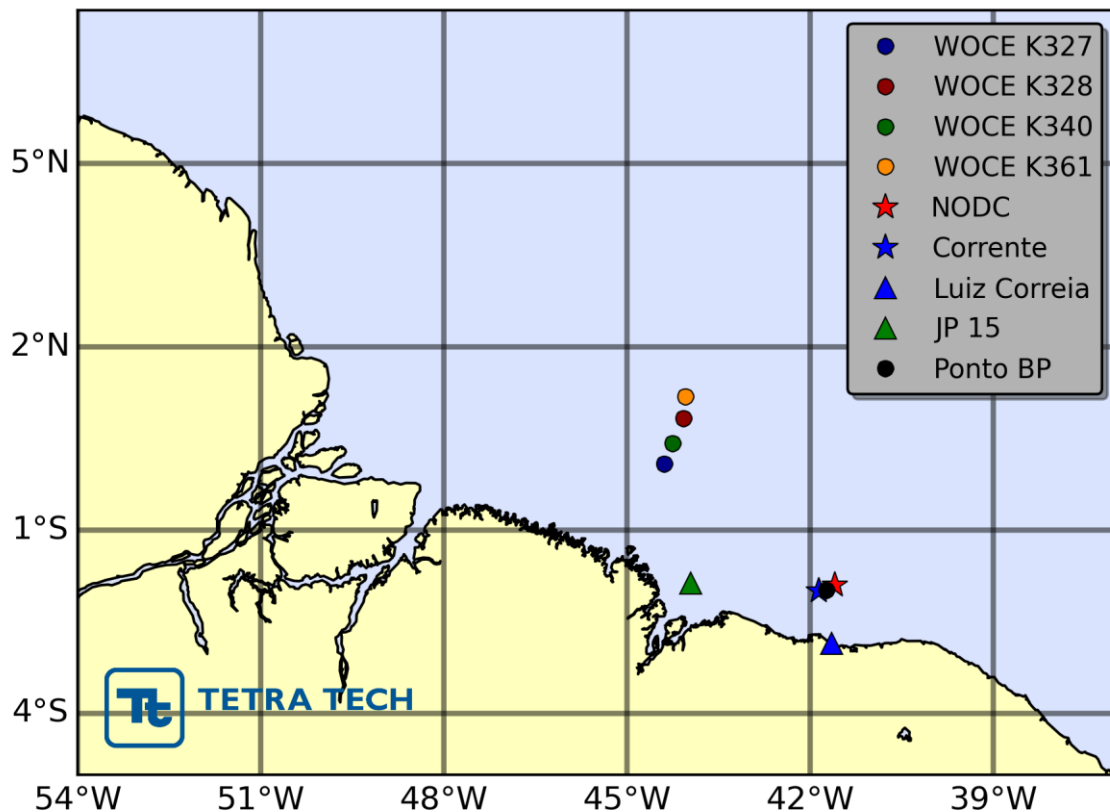


Figura 29 – Localização dos dados utilizados no processo de validação: fundeios WOCE K327, K328, K340 e K361 para correntes; pontos de análise do NODC através de perfis verticais de temperatura e salinidade; e pontos de análise de maré referentes às estações da FEMAR do Porto Luiz Correia e Plataforma JP-15. A localização do ponto de produção da BP na Bacia de Barreirinhas também é indicado.

4.2. Avaliação da Maré

Para avaliação do regime de marés foram utilizados dois pontos de análise ao longo da área de estudo, selecionados como pontos de localização das estações da FEMAR do Porto Luiz Correia (2,85°S e 41,64°W) e Plataforma JP-15 (1,87°S e 43,95°W). Os conjuntos de dados disponibilizados pela FEMAR oferecem informações sobre as constantes harmônicas e médias de sizígia e quadratura, conforme apresentado na Tabela 10 e Tabela 11 respectivamente para Luiz Correa e JP-15.

Tabela 10 - Descrição das componentes harmônicas e médias das sizígias e quadraturas do Porto Luiz Correia. Fonte: FEMAR.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		LUIZ CORREIA (PORTO) – PI			
Localização :		No enrocamento do porto			
Organ. Responsável :		INPH / AHINOR / DHN			
Latitude :		02° 51,1' S	Longitude :		41° 38,7' W
Período Analisado :		04/02/84 a 03/02/85		Nº de Componentes : 51	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		V H 06 min	Nível Médio (Zo):		171 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		311 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		242 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		31 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		100 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	5,9	177	MU ₂	5,1	106
Ssa	-	-	N ₂	22,2	124
Mm	-	-	NU ₂	4,1	119
Mf	-	-	M ₂	105,6	139
MTM	-	-	L ₂	2,9	140
Msf	-	-	T ₂	2,2	148
Q ₁	1,3	176	S ₂	34,4	159
O ₁	7,8	192	K ₂	9,8	156
M ₁	0,7	191	MO ₃	-	-
P ₁	2,5	232	M ₃	1,5	170
K ₁	9,1	217	MK ₃	0,5	203
J ₁	0,6	186	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	1,1	126
MNS ₂	1,0	077	SN ₄	0,3	128
2N ₂	3,1	116	MS ₄	2,1	149
Referências de Nível: NR (AHINOR/INPH) fixada na passarela localizada no enrocamento próximo à estação maregráfica.					
Obs: Outros Períodos: 30/05/75 a 30/06/75 ; 10/02/62 a 13/03/62 . O INPH dispõe de outras observações Consta das Tábuas das Marés.					

Código BNDO: 30225

Tabela 11 - Descrição das componentes harmônicas e médias das sizígias e quadraturas da Plataforma JP-15. Fonte: FEMAR.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação : JP-15 (Plataforma) – MA					
Localização : Baía de São Marcos, no início do canal de acesso ao Terminal da Ponta da Madeira (CVRD)					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 01° 52,2' S		Longitude : 43° 57,1' W			
Período Analisado : 27/05/80 a 27/06/80			Nº de Componentes : 23		
Análise Harmônica : Método Almirante Santos Franco					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		V H 55 min	Nível Médio (Zo):		226 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		408 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		326 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		45 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		127 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	9,5	241
Ssa	-	-	N ₂	33,6	141
Mm	-	-	NU ₂	6,4	144
Mf	-	-	M ₂	140,5	162
MTM	-	-	L ₂	18,4	210
Msf	-	-	T ₂	2,4	203
Q ₁	-	-	S ₂	41,2	205
O ₁	9,4	176	K ₂	11,2	209
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	2,5	219	M ₃	-	-
K ₁	7,6	223	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	-	-
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	4,4	120	MS ₄	-	-
Referências de Nível: Não foram implantadas					
Obs: Não há referências a outros períodos. Maré observada de plataforma oceânica, posteriormente retirada					

Código BNDO: 30122

- 66 -

A maré na área de estudo foi classificada de acordo com a razão entre as duas maiores amplitudes das componentes diurnas e semidiurnas, conforme apresentado na equação abaixo:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{S_2 + M_2} \quad (\text{Eq. 4.2-1})$$

Tanto para a estação de Luiz Correia quanto para JP-15 os valores de F foram próximos de zero (0,12 e 0,09, respectivamente), indicando domínio das amplitudes das componentes semidiurnas S_2 e M_2 . Portanto, a maré da região do Bloco BAR-M-346 é classificada como semidiurna.

A obtenção das alturas da oscilação de maré astronômica, para comparação com os resultados do modelo Delft3D, foi realizada através do método de análise e previsão harmônica, baseada na análise de Fourier desenvolvida por Schuremann (1958).

A análise harmônica de maré é realizada admitindo-se que as variações do nível do mar próximo à costa podem ser expressas matematicamente pela soma de séries harmônicas relacionadas a condições astronômicas. Uma função harmônica simples é uma quantidade que varia com o cosseno de um ângulo, que progride uniformemente no tempo. Sua formulação é dada genericamente por $y = A \cos(at)$, onde y é a função harmônica do ângulo (at) , a é uma constante e t representa o tempo decorrido a partir de uma data inicial.

A equação geral para uma altura h de maré a qualquer instante de tempo t pode ser escrita como:

$$h = Z_0 + A \cos(at + \alpha) + B \cos(bt + \beta) + C \cos(ct + \gamma) + \text{etc} \dots (\text{Eq. 4.2-2})$$

onde Z_0 é a altura do nível médio do mar acima do *datum* usado, e os termos com cossenos são conhecidos como constituintes ou componentes harmônicos. Os coeficientes A , B , C , etc., são as amplitudes de cada constituinte. Estes coeficientes são constantes, sendo obtidos através de observações de maré em cada localidade. A expressão entre os parênteses nos constituintes harmônicos é um ângulo que varia uniformemente e seu valor é chamado de fase.

A previsão harmônica de maré para esta análise foi gerada para um período de referência englobando o ano de 2014 nas estações de Luiz Correia e JP-15, conforme apresentado na Figura 30 e Figura 31.

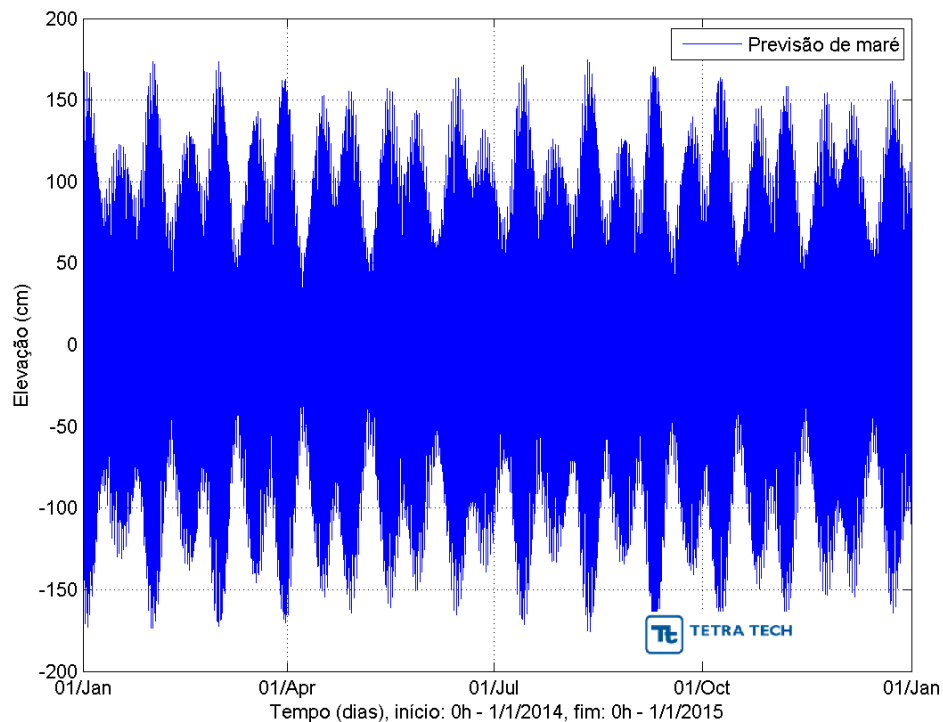


Figura 30 – Previsão harmônica de maré obtida para a região do Porto de Luiz Correia (PI) para o período de referência (ano de 2014), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR. Fonte: TETRA TECH.

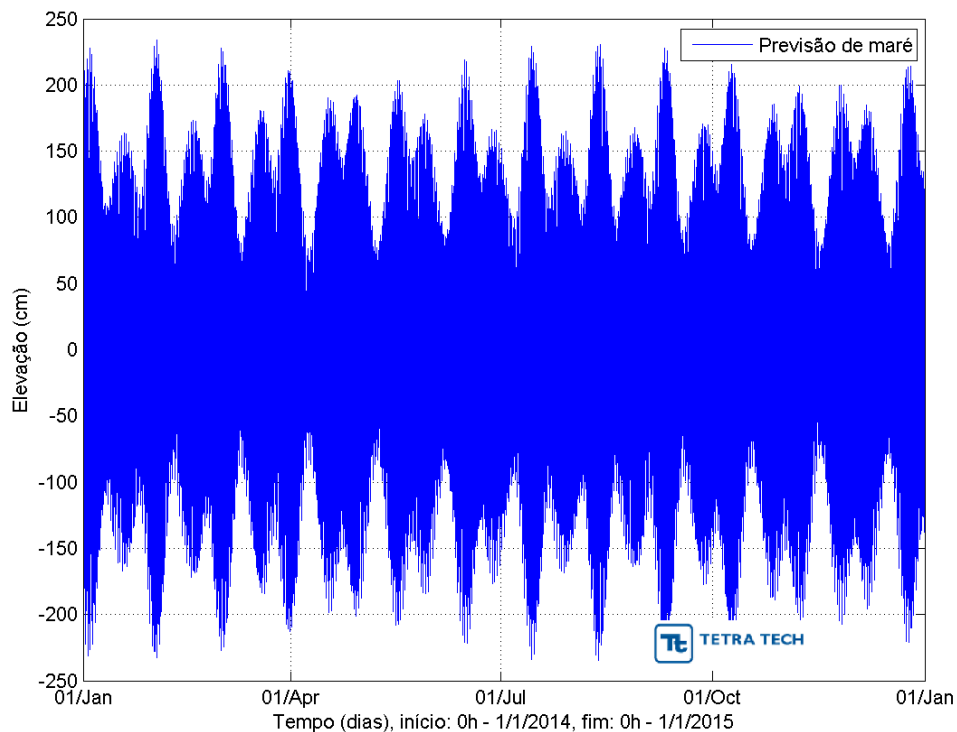


Figura 31 – Previsão harmônica de maré obtida para a região da Plataforma JP-15 (MA) para o período de referência (ano de 2014), a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR. Fonte: TETRA TECH.

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica com relação à elevação da superfície do mar, foram comparadas as séries temporais de nível obtidas através da previsão harmônica (descritas acima) e as séries extraídas dos resultados da modelagem numérica nos respectivos pontos de análise. A Figura 32 e Figura 33 ilustram a coerência existente no comportamento da elevação da superfície do mar, através da comparação de séries temporais para períodos de 30 dias em cada estação. A análise das séries indica a boa representação da realidade pela modelagem numérica, como também confirmado pelos espectros de amplitude destes dados, apresentados na Figura 34 e Figura 35.

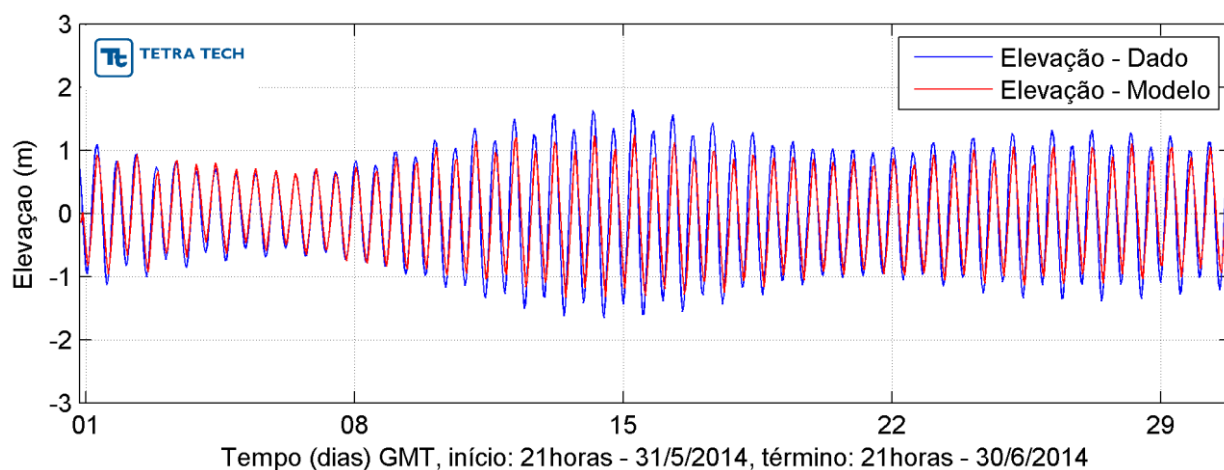


Figura 32 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m) para o período de 01/06/2014 a 30/06/2014 na estação do Porto Luiz Correia, mostrando os valores previstos em azul e a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica em vermelho.

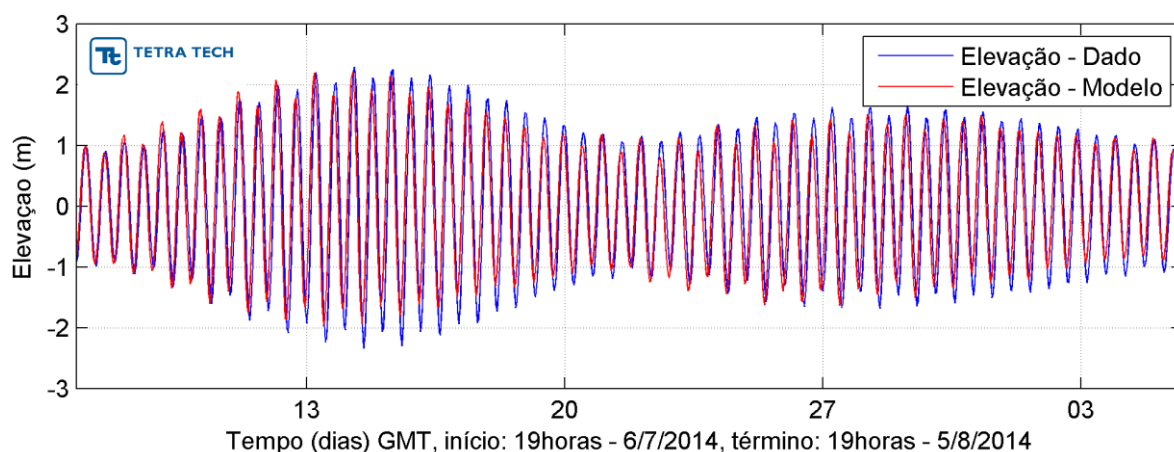


Figura 33 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m) para o período de 06/07/2014 a 05/08/2014 na estação da Plataforma JP-15, mostrando os valores previstos em azul e a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica em vermelho.

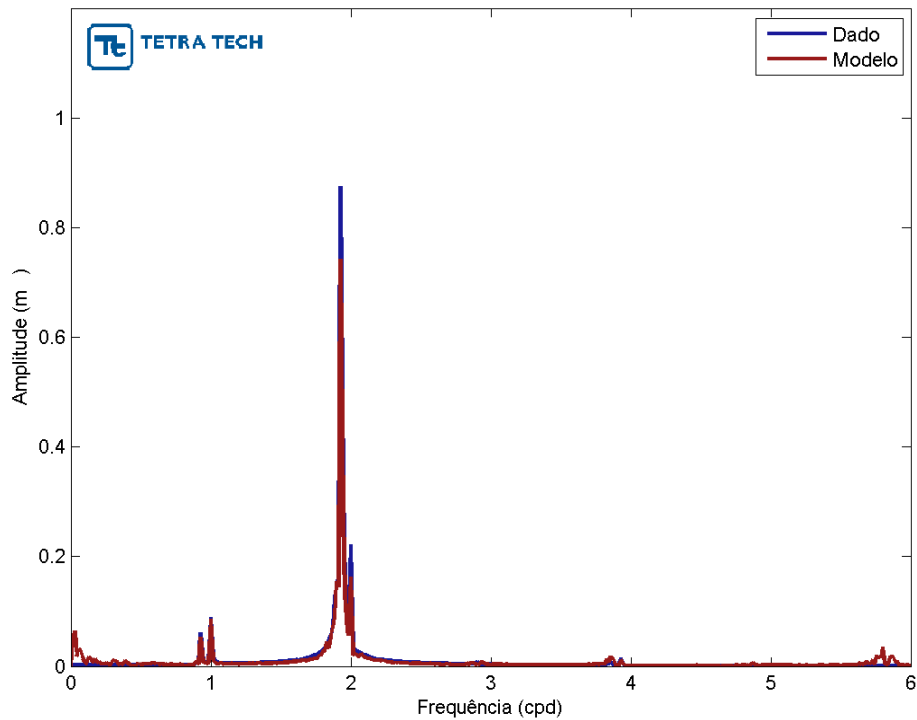


Figura 34 - Espectro total de amplitudes para a elevação (m), comparando dados da previsão harmônica (azul) e resultados da modelagem hidrodinâmica (vermelho) no ponto da estação do Porto Luiz Correia.

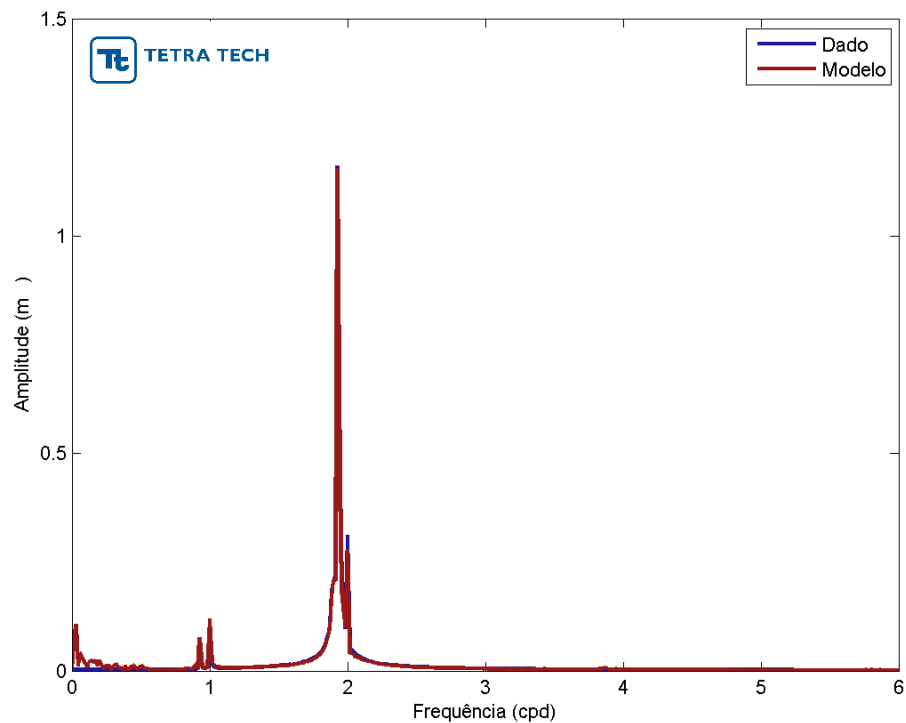


Figura 35 - Espectro total de amplitudes para a elevação (m), comparando dados da previsão harmônica (azul) e resultados da modelagem hidrodinâmica (vermelho) no ponto da estação da Plataforma JP-15.

Para uma avaliação quantitativa entre os resultados obtidos para o nível do mar proveniente da modelagem hidrodinâmica e dos dados de maré (previsão harmônica), foram utilizados os seguintes parâmetros ou índices:

- 1) Índice de concordância (*Index of Agreement*) proposto por Willmott & Wicks (1980) (*apud* WILLMOTT, 1982), definido por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{modelo}_i - \overline{\text{dado}}| + |\text{dado}_i - \overline{\text{dado}}|)^2} \right] \quad (\text{Eq. 4.2-3})$$

onde: $\overline{\text{dado}}$ = média do dado.

Segundo os autores, para valores de $d > 0,5$ a modelagem apresenta uma significativa redução de erros. O valor ideal de d é 1 (um).

- 2) Coeficiente de correlação linear, ou coeficiente de correlação de Pearson, definido por (SPIEGEL & STEPHENS, 1999):

$$R = \frac{\text{cov}(\text{dado}, \text{modelo})}{\sigma_D \sigma_M} \quad (\text{Eq. 4.2-4})$$

onde: $\text{cov}(\text{dado}, \text{modelo})$ = covariância entre os valores do dado e os do modelo; σ_D = desvio padrão do dado e σ_M = desvio padrão do modelo.

A covariância entre x_1 e x_2 é definida por:

$$\text{cov}(x_1, x_2) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x_1(t) - \overline{x_1})(x_2(t) - \overline{x_2}) \quad (\text{Eq. 4.2-5})$$

O desvio-padrão de x é definido por:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} (x(t) - \overline{x})^2} \quad (\text{Eq. 4.2-6})$$

O coeficiente de correlação linear é uma medida da dependência linear entre os resultados da modelagem e as observações. O coeficiente de correlação linear ideal, para este caso, é igual a um.

Os valores dos índices obtidos na avaliação dos resultados da modelagem nas estações de Luiz Correia e JP-15 são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Índices de avaliação dos resultados de elevação do modelo.

ÍNDICE	PORTO DE LUIZ CORREIA	PLATAFORMA JP-15
<i>Index of Agreement</i>	0,94	0,92
Correlação linear	91%	85%

Através das comparações apresentadas, foi possível constatar que o modelo reproduziu adequadamente a elevação da superfície do mar em pontos representativos da área de estudo, tanto na região da estação do Porto de Luiz Correia quanto na região da Plataforma JP-15, com boa correlação na amplitude e na fase da maré.

4.3. Avaliação das Correntes

Os resultados da simulação hidrodinâmica foram comparados com dados observacionais coletados na região de estudo, sendo estes provenientes de fundeios oceanográficos (WOCE).

Entre 1990 e 1997, o *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE), uma ramificação do *World Climate Research Programme* (WCRP), contou com a colaboração de mais de 30 países para realizar um projeto de observações via satélite e medições *in-situ* em todos os oceanos. Este programa, patrocinado por organizações intergovernamentais e não-governamentais teve por objetivo estudar o papel dos oceanos no sistema climático global. Cientistas dos países colaboradores, inclusive do Brasil, combinaram esforços para realizar um experimento de observação e coleta de dados oceânicos no entre 1990 e 1997. Os objetivos principais do programa envolveram: o desenvolvimento de modelos oceânicos, coleta de dados necessários para avaliar tais modelos, e a representação do conjunto de dados WOCE para avaliar o comportamento de longo prazo dos oceanos.

As informações de correntes apresentadas a seguir foram obtidas junto ao banco de dados do WOCE e referem-se aos fundeios oceanográficos K327, K328, K340 e K361 do cruzeiro ACM-7, realizados na região de plataforma Norte do Brasil, mais especificamente na Bacia de Barreirinhas. Os dados disponibilizados pelo WOCE para os respectivos fundeios foram coletados no período entre setembro de 1989 até outubro de 1990. As informações sobre a localização dos mesmos são apresentadas na Tabela 13, e a ilustração das posições é mostrada na Figura 29.

Tabela 13 – Coordenadas, profundidades de coleta e espessura da lâmina d'água dos dados de corrente dos fundeios WOCE para a região da Bacia de Barreirinhas (cruzeiro ACM-7).

FUNDEIO	LATITUDE	LONGITUDE	PROFUNDIDADES (m)	LÂMINA D'ÁGUA
K327	0,087°N	44,39°W	50, 100 e 200	300 m
K328	0,833°N	44,07°W	72, 1.990 e 2.588	3.695 m
K340	0,420°N	44,25°W	50, 850 e 3.235	3.235 m
K361	1,186°N	44,04°W	50, 1.483 e 3.785	3.785 m

Para avaliar a habilidade da modelagem em reproduzir os padrões observados nos dados de fundeios do WOCE, que não abrangeram o período de simulação, foram elaboradas rosas direcionais para o período total de cada conjunto de dados (observados e simulados). Desta forma foi possível avaliar a direção predominante do fluxo e as velocidades associadas em três profundidades principais: superfície, meia-água e fundo. Da Figura 36 à Figura 47 são apresentadas as rosas de correntes comparativas entre cada um dos fundeios e os resultados extraídos do modelo. As rosas seguem a convenção oceanográfica, onde a direção apresentada refere-se ao Norte geográfico e indica a direção de fluxo da corrente, a intensidade (m/s) é representada pela escala de cores e a distância radial indica a porcentagem de observações.

WOCE ACM-7 K327

Próximo à superfície, as correntes seguem predominantemente na direção NW no ponto de localização do fundeiro WOCE K327 (Figura 36). Este padrão é observado tanto nos dados de fundeiro quanto nos resultados da modelagem. Neste ponto as intensidades observadas e simuladas são semelhantes, com máximas em torno de 1,2 a

1,4 m/s. As correntes em níveis intermediários são um pouco menos intensas, com máxima de 1,2 m/s tanto nos dados medidos quanto nos simulados (Figura 37). Assim como em níveis intermediários, observa-se próximo à camada de fundo uma semelhança entre o padrão de correntes medidas e simuladas (Figura 38), sendo que neste nível de profundidade as intensidades predominantes variam entre 0,6 e 1 m/s, com direção principal para NW.

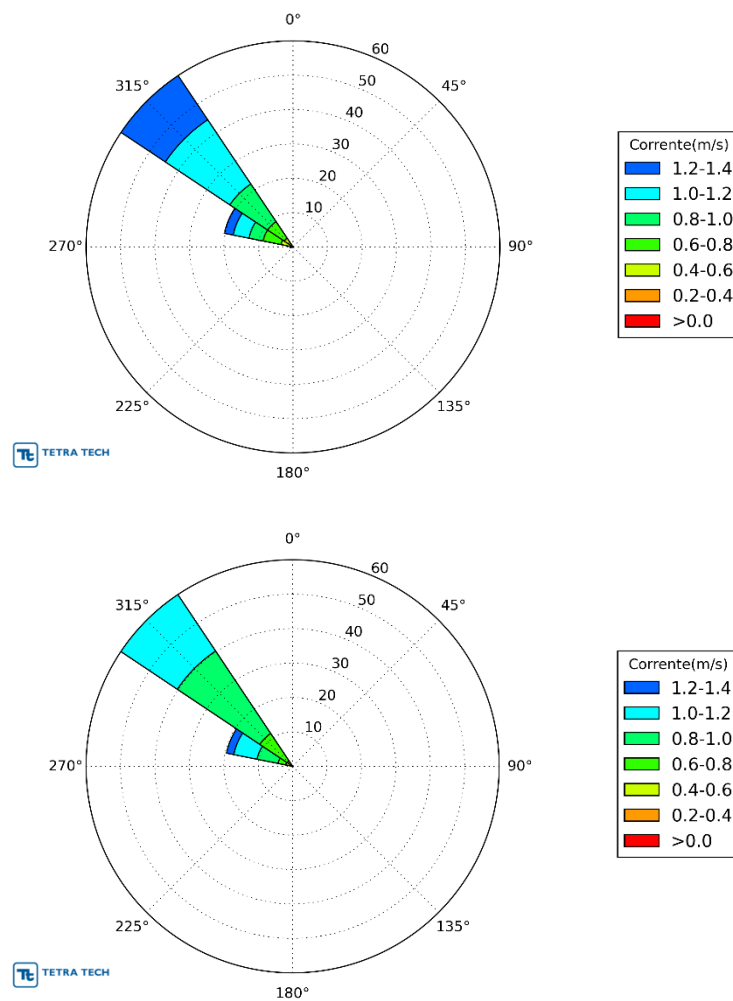


Figura 36 – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

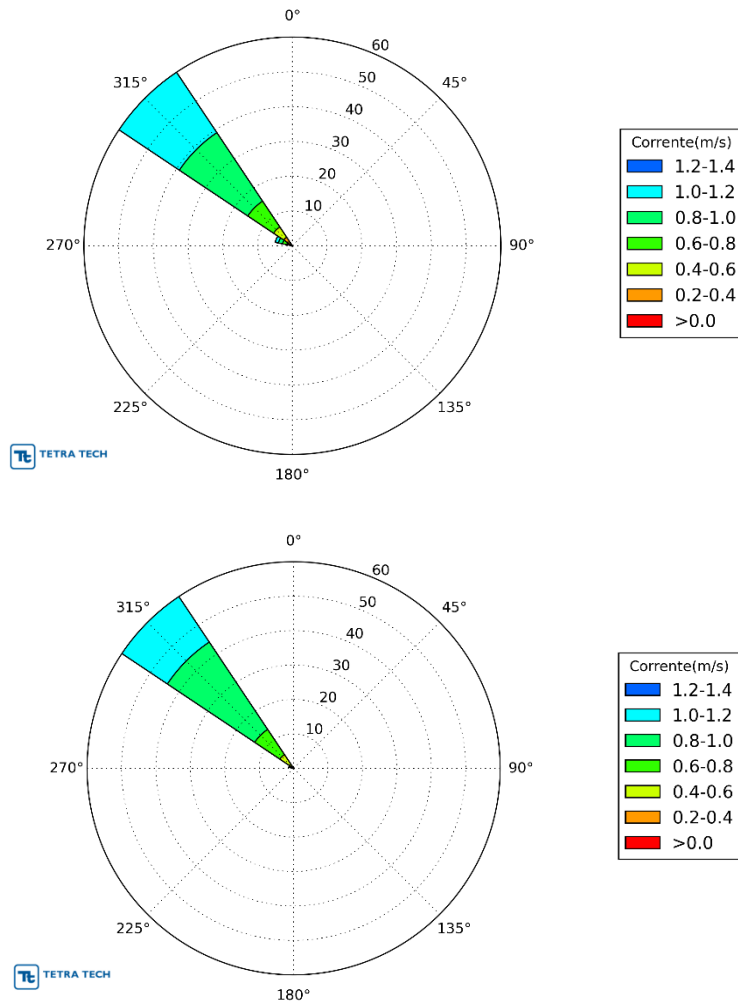


Figura 37 – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

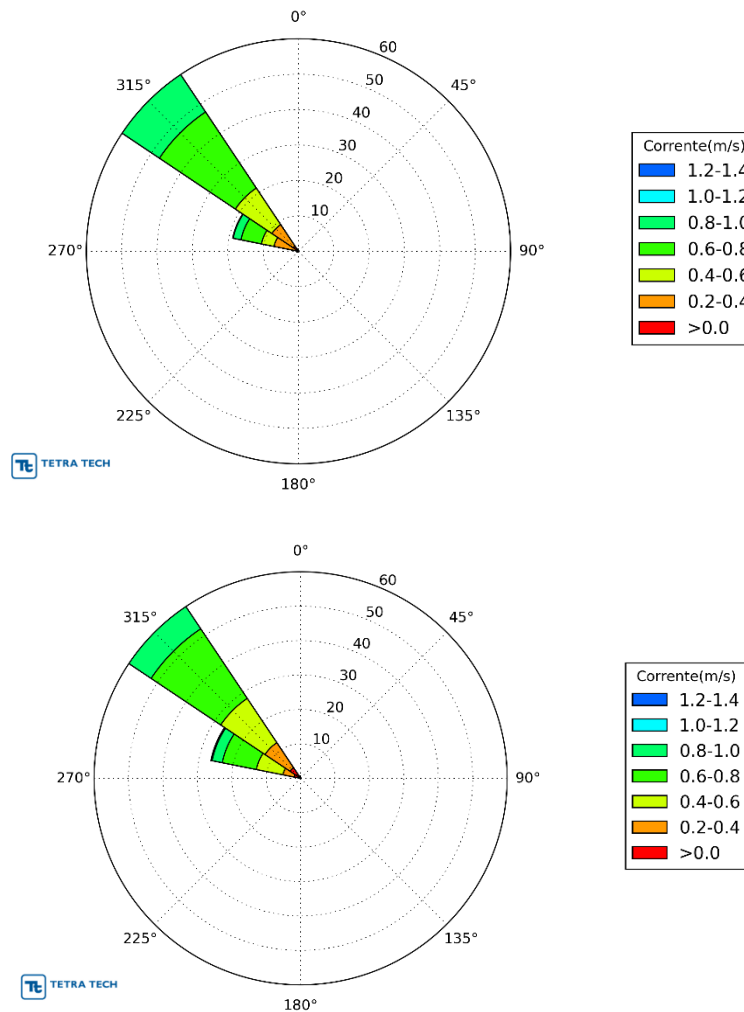


Figura 38 – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K327, obtidas a partir de dados do WOCCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

WOCCE ACM-7 K328

A lâmina d'água da posição do fundeio K328 tem profundidade aproximada de 3700m, sendo o fundeio mais profundo dentre os analisados (Tabela 13). Novamente, observa-se uma predominância do fluxo para NW nas camadas superficiais e intermediárias (Figura 39 e Figura 40), apesar de um maior espalhamento para o quadrante W e menor intensidade do fluxo em relação aos dados analisados no fundeio K327. Esse padrão é observado tanto nos dados medidos, como nos resultados da simulação. Na camada de fundo (Figura 41) observa-se uma inversão do padrão de correntes, que fluem principalmente para SSE com intensidades menores que 0,4 m/s

em todas as bases. Tal inversão corresponde à presença da Corrente de Contorno Oeste Profunda (CCOP), um fluxo da camada profunda que ocupa o contorno oeste do oceano Atlântico. Esta corrente é responsável pelo transporte de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) para o Hemisfério Sul.

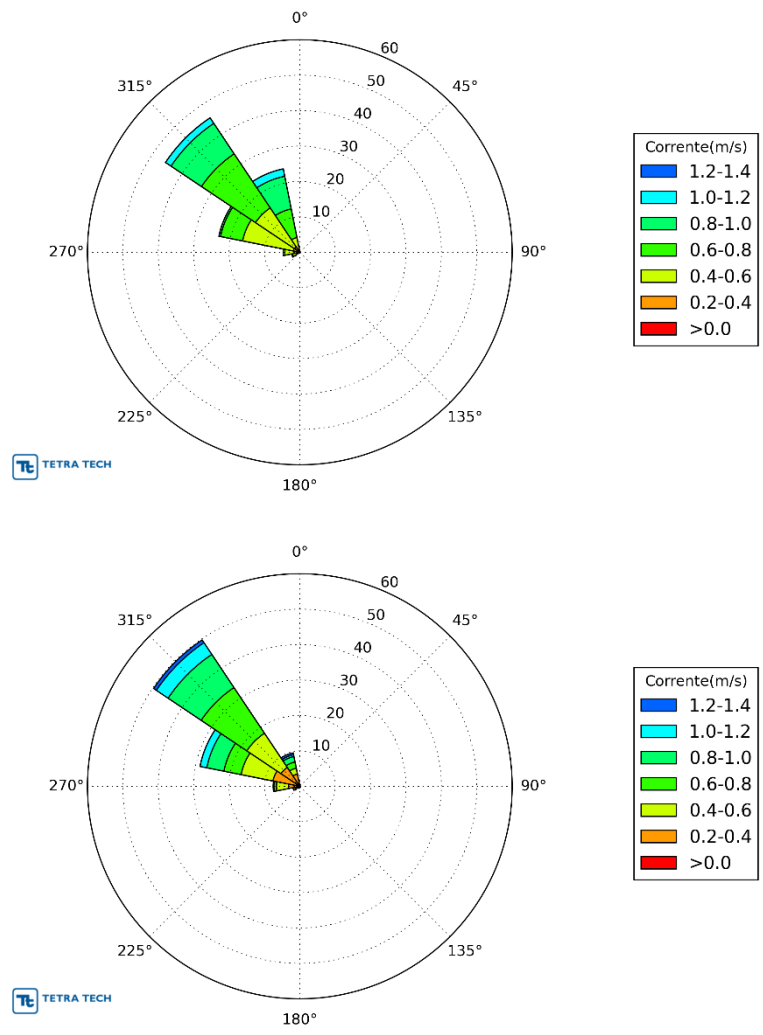


Figura 39 – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K328, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

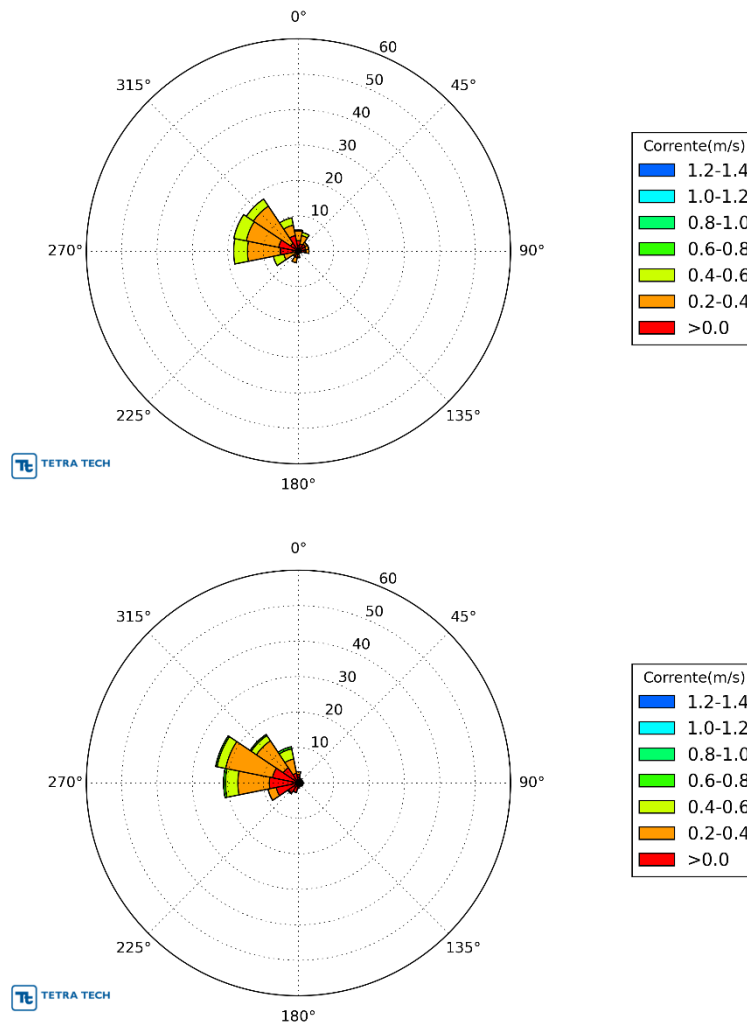


Figura 40 – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K328, obtidas a partir do WOCCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

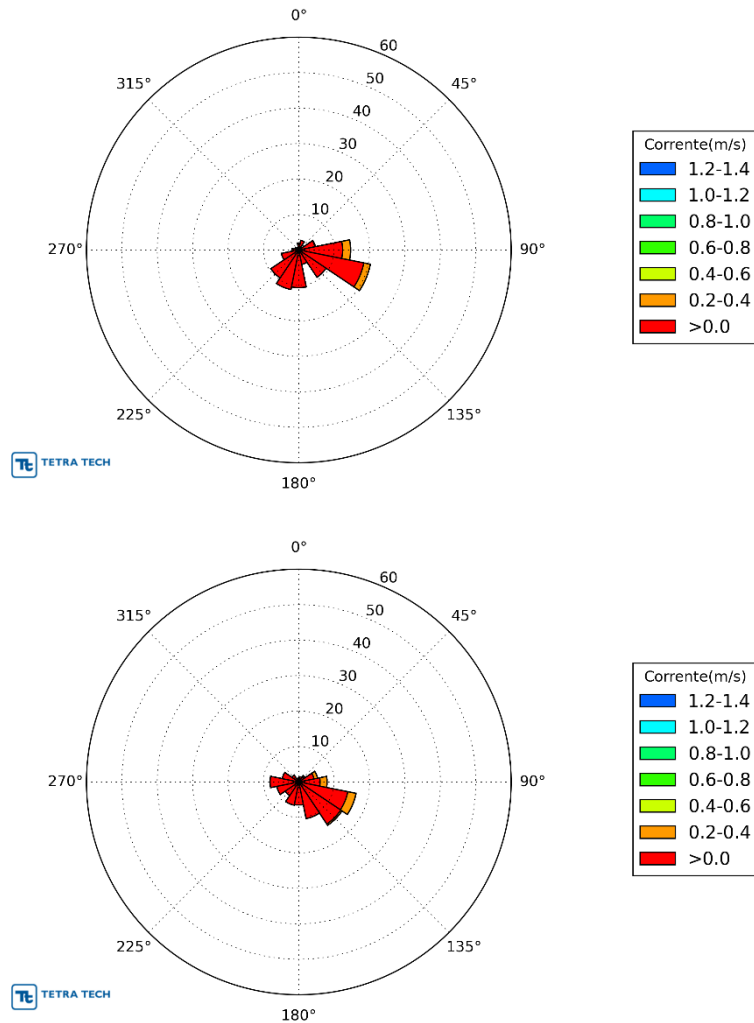


Figura 41 – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K328, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

WOCE ACM-7 K340

A região do fundeio K340 tem profundidade aproximada de 850 m. Na camada superficial oceânica (Figura 42), as correntes simuladas são muito semelhantes às aquelas observadas nos dados do WOCE, tanto na distribuição de velocidades como de direções. As intensidades máximas ocorrem entre 1,2 e 1,4 m/s, com direção predominante de NW, seguida de WNW. Tal semelhança é evidente também em níveis intermediários e profundos. Na camada intermediária (Figura 43), verifica-se que as velocidades máximas observadas e simuladas estão entre 0,4 e 0,6 m/s e seguem a

direção ESE. Em níveis mais profundos (Figura 44), as direções são semelhantes àsquelas encontradas em níveis intermediários, todavia com menores intensidades tanto no fundeio quanto no modelo, de até 0,2 m/s.

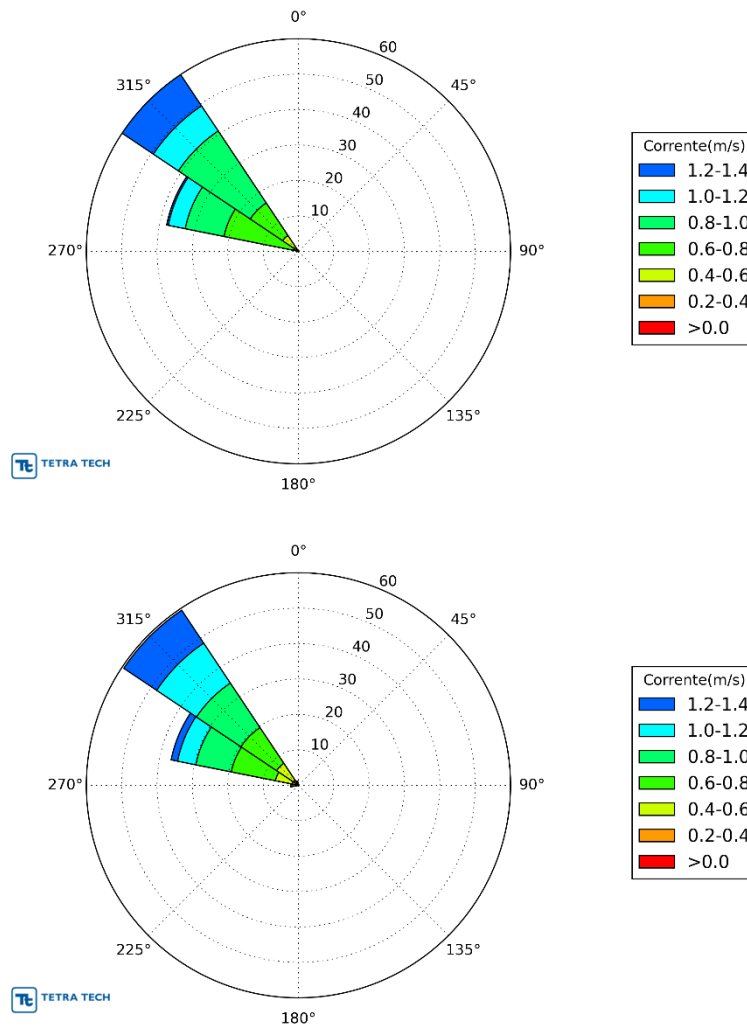


Figura 42 – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

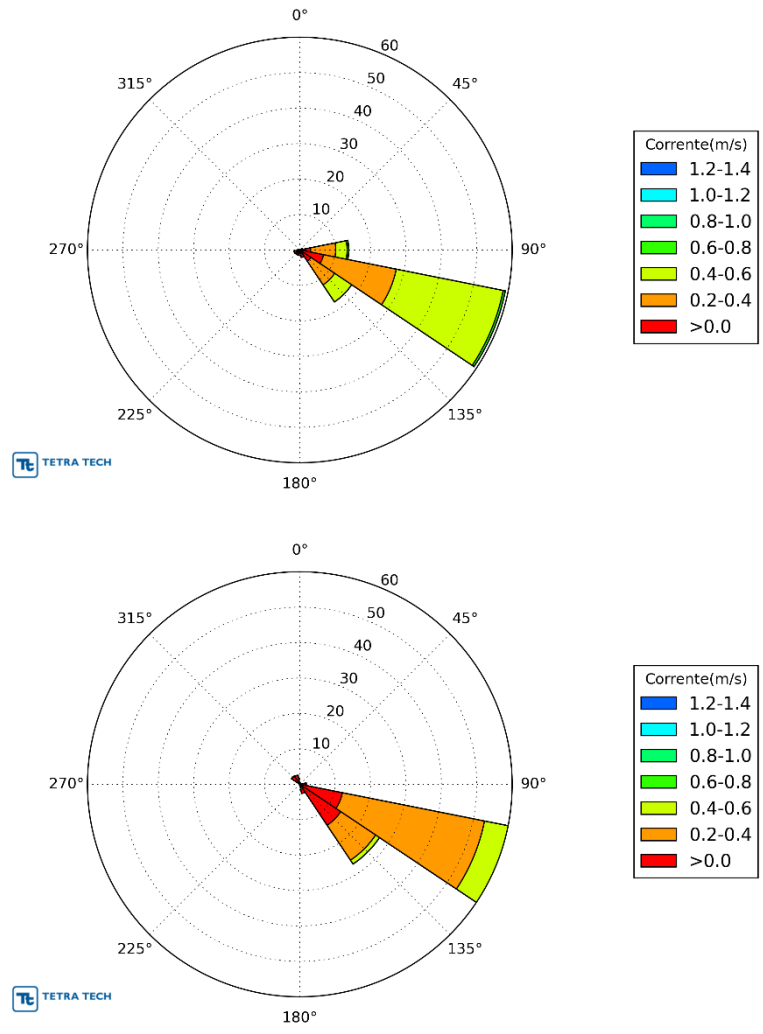


Figura 43 – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

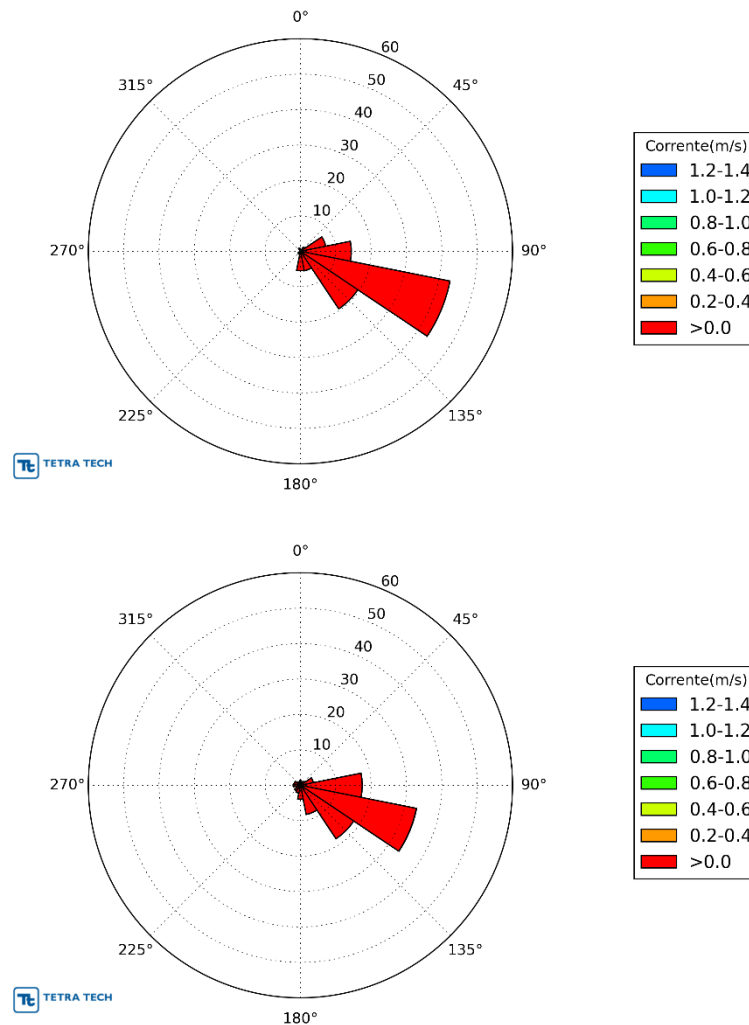


Figura 44 – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K340 obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

WOCE ACM-7 K361

O fundeio K361 encontra-se em profundidade aproximada de 1.800 m (Tabela 13). Neste ponto, observa-se uma maior variância nas intensidades das correntes na camada superficial oceânica (Figura 45). As direções das correntes medidas e simuladas variam entre NE, WSW e W, tanto nos dados medidos, como nos padrões apresentados pela modelagem.

Em níveis intermediários e profundos, as velocidades medidas e simuladas têm intensidades predominantes menores que 0,2 m/s. Em níveis intermediários (Figura 46) as correntes seguem nos quadrantes de W, enquanto em maiores profundidades (Figura 47) entre os quadrantes de ESE e S.

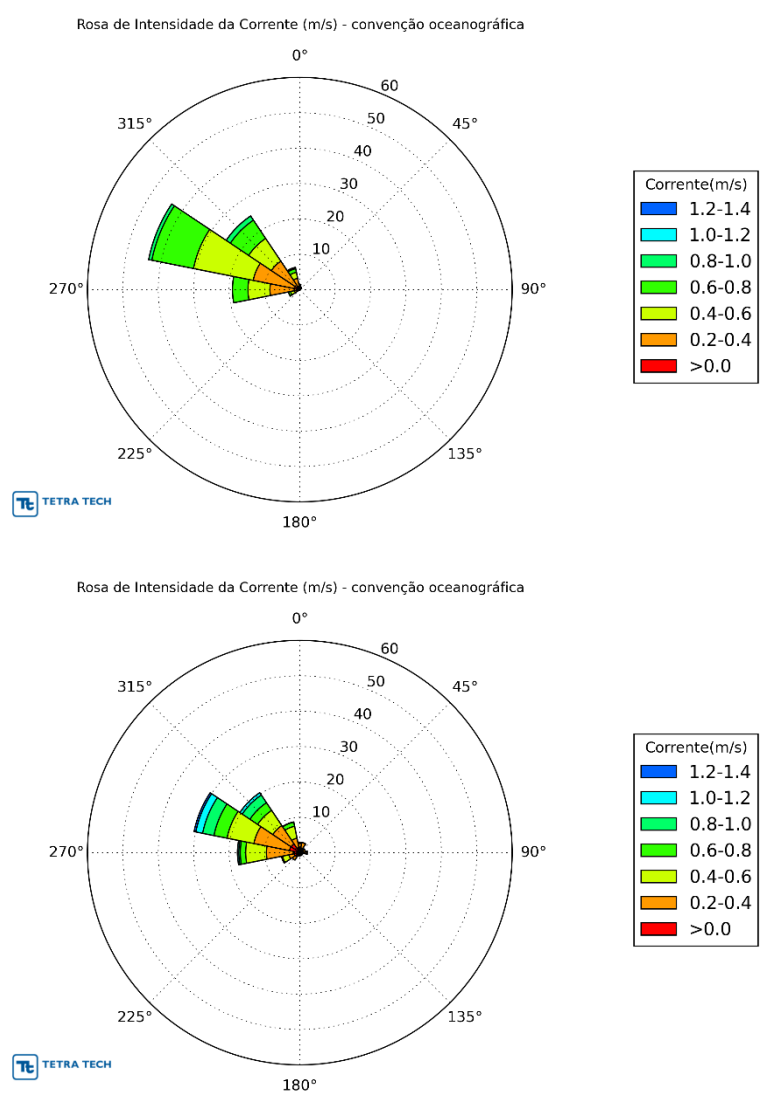


Figura 45 – Rosas de corrente da camada superficial para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

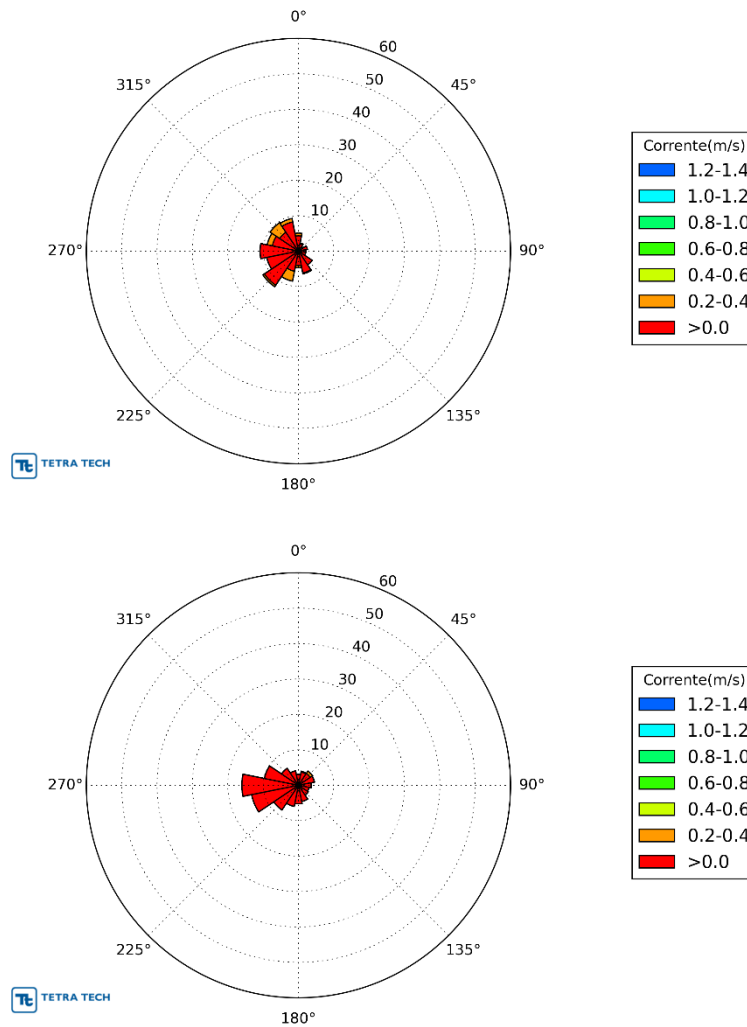


Figura 46 – Rosas de corrente da camada intermediária para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

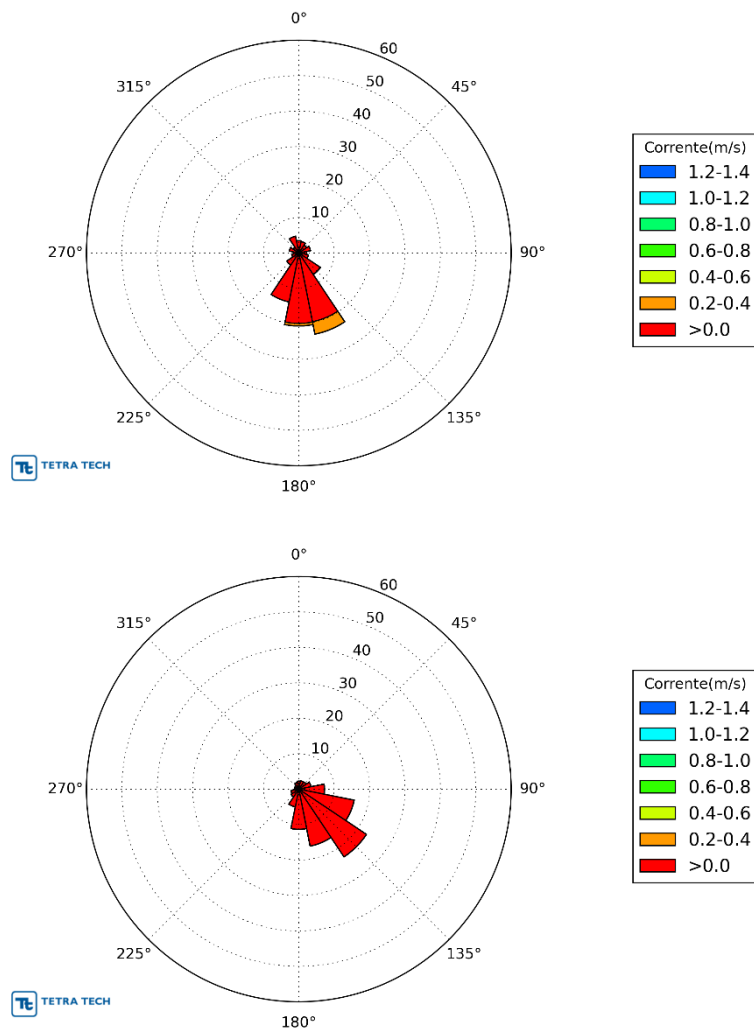


Figura 47 – Rosas de corrente da camada de fundo para o ponto K361, obtidas a partir de dados do WOCCE (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

4.4. Avaliação da Temperatura

Para a avaliação da Temperatura Superficial do Mar (TSM), foram utilizados dados provenientes do projeto OISST⁵, da NOAA, com resolução espacial de 0,25 graus e temporal de 1 dia. Os valores de TSM são obtidos com base em observações de diferentes plataformas, tais como satélites, navios e boias oceanográficas. Os dados orbitais inseridos no OISST são provenientes dos sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e *Advanced Microwave Scanning Radiometer on the Earth Observing System* (AMSR-E), sendo que os dados provenientes do AVHRR

⁵Optimum Interpolation Sea Surface Temperature <<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>>. Último acesso em 14/09/2015.

abrangem o período de 1981 até a atualidade e os dados do AMSR-E estão disponíveis no período de 2002 a 2011.

Os dados orbitais e observacionais são interpolados para uma grade global regular através de técnicas de interpolação ótima, com o objetivo de corrigir regiões onde não há dados mensurados *in situ* ou regiões afetadas pela cobertura de nuvens, que não permitem medição direta pelo satélite.

Além dos dados observacionais, são incluídas também anomalias da TSM calculadas num período de 30 anos e a mediana da concentração do gelo marinho computada em intervalos de 7 dias. O objetivo da inclusão destes dados é corrigir erros gerados por anos anômalos (*El Niños e La Ninas*) e erros causados na interface gelo-oceano, onde os satélites são incapazes de garantir bons resultados. As metodologias de incorporação de dados e estatísticas utilizadas são encontradas em Reynolds *et al.* (2007).

4.4.1. Campos Superficiais

Da Figura 48 à Figura 51 estão representados os campos superficiais de temperatura do mar para as estações de verão (janeiro, fevereiro, março), outono (abril, maio, junho), inverno (julho, agosto e setembro) e primavera (outubro, novembro e dezembro) para o ano de 2014, obtidos através dos dados do OISST e resultados da modelagem.

Nos campos de TSM para o período de verão de 2014 (Figura 48), observa-se que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente os campos de temperatura superficial quando comparado com os dados do OISST. Tanto nos dados observados como nos resultados da simulação, as temperaturas mais elevadas ocorrem nas proximidades da costa. A porção norte do domínio apresenta as menores temperaturas superficiais.

Assim como descrito para o verão, nos campos de TSM gerados para o outono (Figura 49) as maiores temperaturas ocorrem nas regiões costeiras. Na porção sul do domínio é evidenciado o sinal da Corrente Norte do Brasil, com temperaturas mais elevadas que na parte norte nas três bases analisadas.

As condições de TSM para o inverno de 2014 (Figura 50) apontam uma inversão nos padrões de temperatura em relação aos meses de verão e outono. Neste período as

águas mais ao norte apresentam temperaturas relativamente superiores se comparadas à porção sul da área de estudo. Essa dinâmica ocorre devido ao aquecimento gerado no verão do hemisfério Norte, que eleva a temperatura superficial oceânica na porção norte da área de estudo. Os resultados obtidos na modelagem refletem de maneira satisfatória o que é observado nos dados do OISST. A Figura 51 mostra os campos de TSM para a primavera de 2014, onde observa-se um padrão semelhante ao de inverno, com águas mais frias na porção sul do domínio, que são carregadas pela Corrente Norte do Brasil. As porções norte e costeira apresentam águas mais quentes.

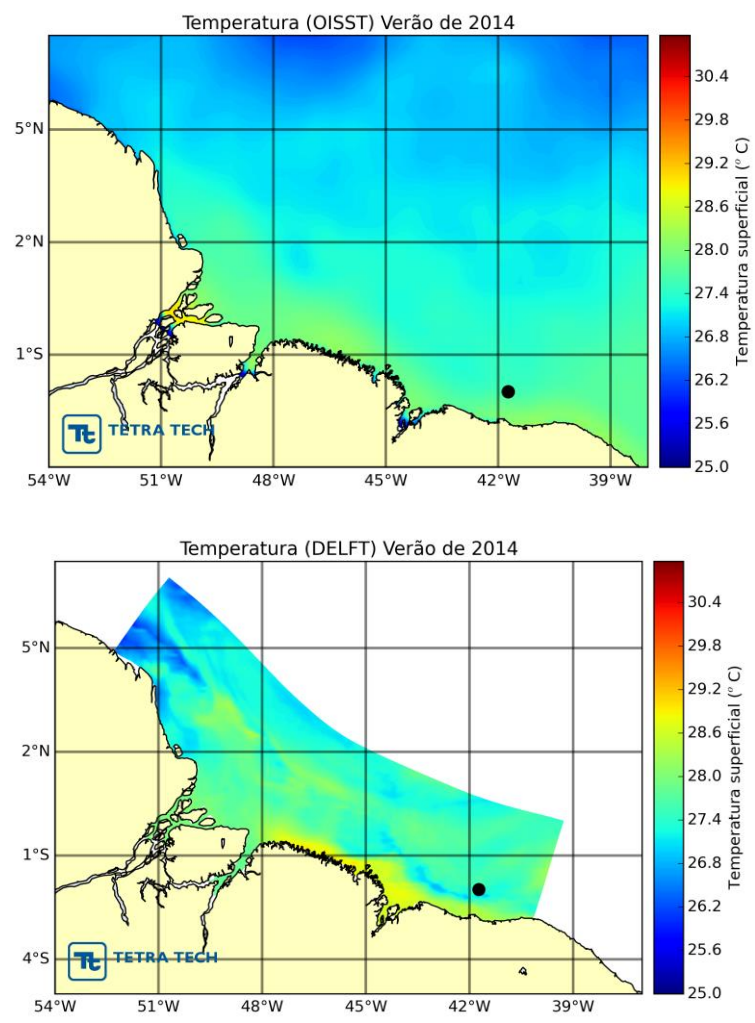


Figura 48 – Campos superficiais de temperatura do mar para o verão de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

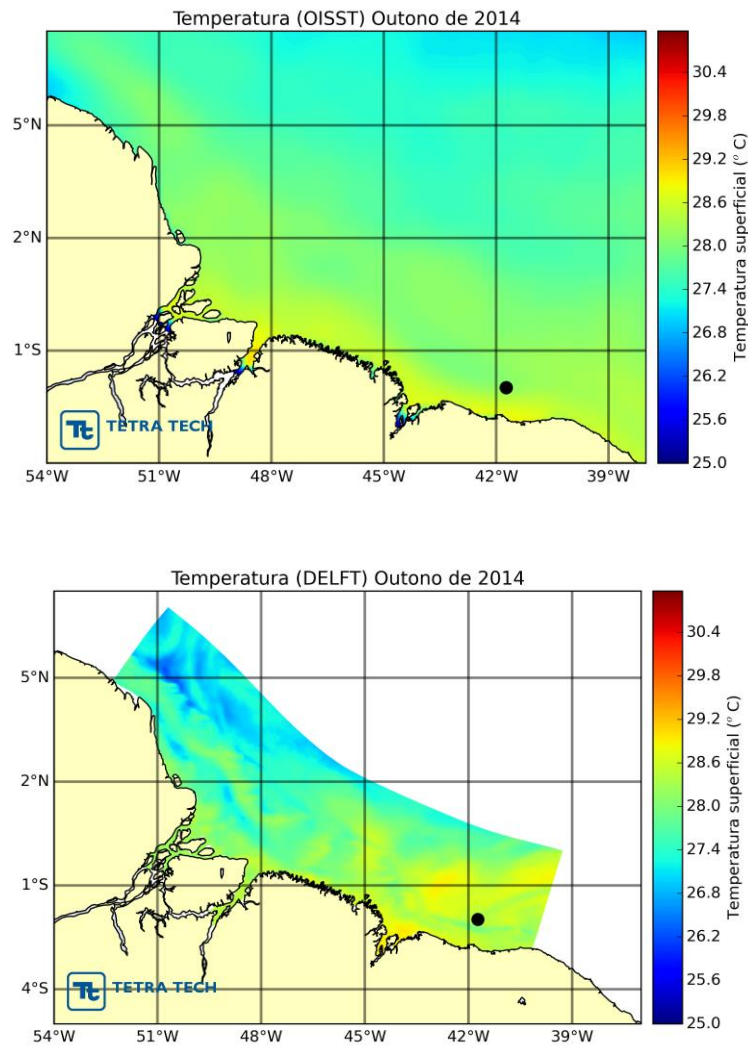


Figura 49 – Campos superficiais de temperatura do mar para o outono de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

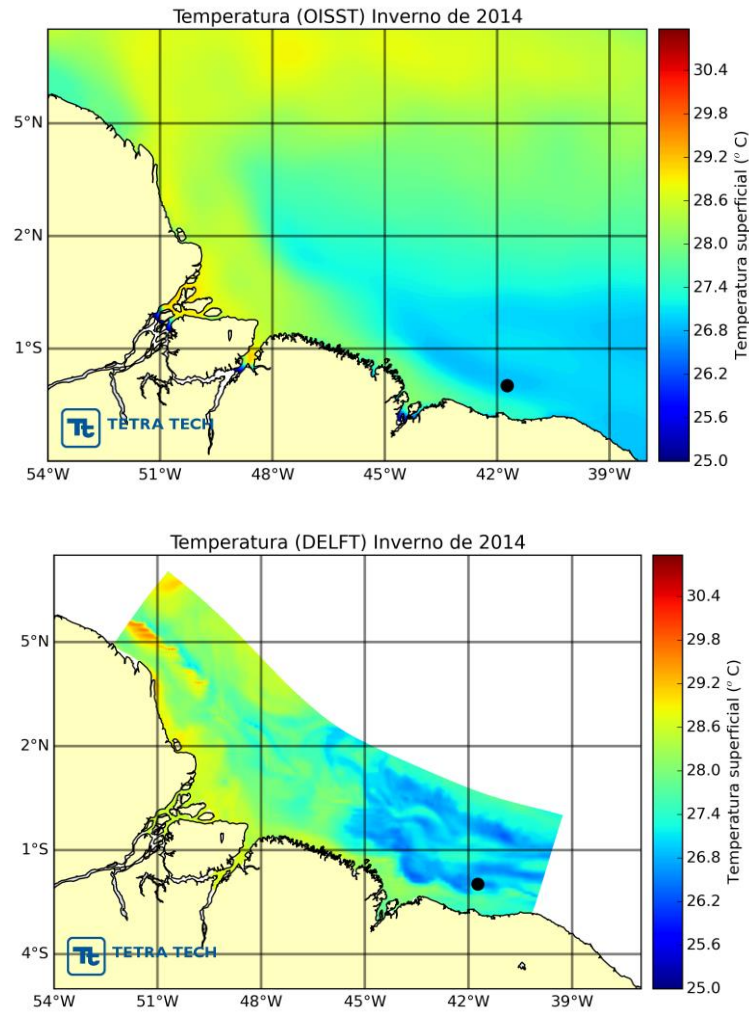


Figura 50 – Campos superficiais de temperatura do mar para o inverno de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

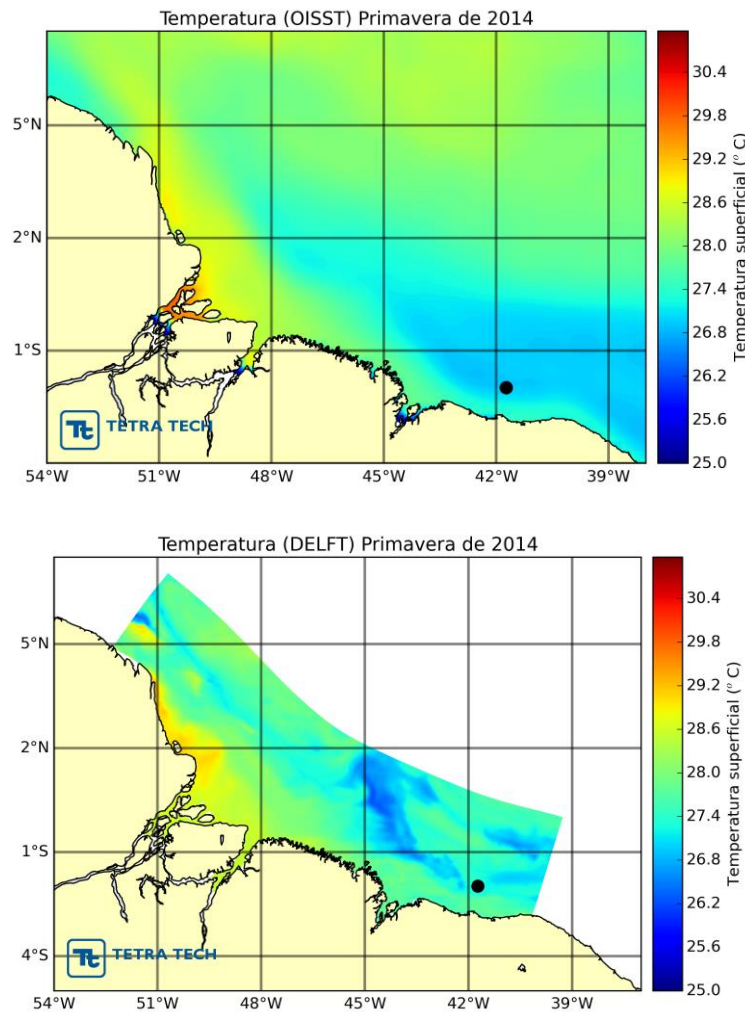


Figura 51 – Campos superficiais de temperatura do mar para a primavera de 2014, a partir dos dados OISST (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: Tetra Tech.

4.4.2. Perfis Verticais

Os dados de temperatura utilizados para a avaliação dos perfis verticais são provenientes da base de dados da NOAA, através do Atlas Eletrônico de dados do WOA13⁶. Este atlas é composto por diversos conjuntos de dados conceituados (garrafas, CTDs, batitermógrafos, boias fundeadas, boias de deriva e perfiladores), que são disponibilizados pela comunidade científica e deram origem a diversas descobertas sobre os parâmetros físicos da água do mar em oceano aberto. Estes dados,

⁶ World Ocean Atlas 2013. Disponível em <<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>>.

provenientes de diversas expedições oceanográficas são compilados pelo NODC⁷, da NOAA, e interpolados para uma resolução horizontal de 1/4° em sua versão mais recente. Detalhes acerca dos procedimentos de interpolação, filtragem e validação dos dados podem ser encontrados em Locarnini *et al.* (2013) e Zweng *et al.* (2013).

Para a avaliação do comportamento da temperatura do mar, perfis verticais da temperatura média foram gerados para cada estação do ano e especificamente na região do Ponto de Produção. O ponto analisado tem coordenadas 1,98°S e 41,73°W (ver posicionamento no item 4.1) e contém informações oceanográficas desde a superfície até aproximadamente 1200 metros.

A Figura 52 mostra os perfis verticais de temperatura para as estações de verão (janeiro a março), outono (abril a junho), inverno (julho a setembro) e primavera (outubro a dezembro), obtidos através dos dados do NODC e dos resultados da modelagem. Os perfis resultantes do modelo referem-se ao ano de 2014.

A Figura 52 traz a representação dos perfis verticais de temperatura para o ponto K340. Pode-se observar que o modelo representa, de forma bastante satisfatória os padrões dos dados observacionais do NODC. Em ambos os conjuntos de dados verifica-se uma camada de mistura que se estende até cerca de 100 metros. A termoclina abrange profundidades superiores, desde a base da camada de mistura até cerca de 800 metros, seguida da camada do oceano profundo.

⁷ National Oceanographic Data Center <<https://www.nodc.noaa.gov/>>.

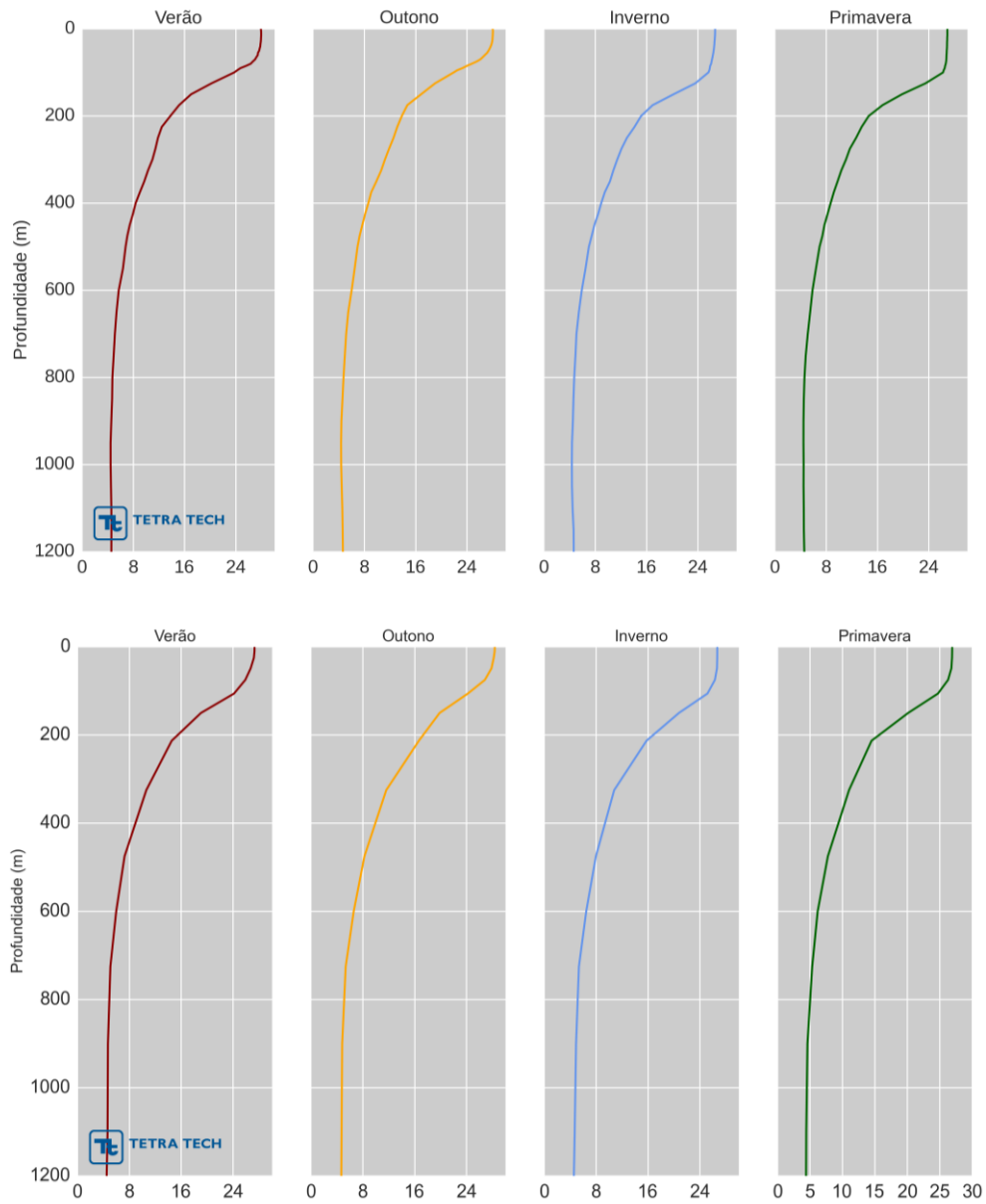


Figura 52 – Perfis verticais sazonais de temperatura no ponto de estudo da BP, a partir dos dados NODC (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

4.5. Avaliação da Salinidade

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica quanto à Salinidade da Superfície do Mar (SSM), os resultados do modelo foram comparados aos dados obtidos pelo satélite SMOS⁸ (*Soil Moisture Ocean Salinity*), da agência espacial europeia (*European Spatial Agency - ESA*), distribuídos pelo *Barcelona Expert Center* (BEC) através do portal CP34-BEC⁹. Os valores de salinidade são obtidos através de um radiômetro instalado no satélite, sendo em seguida processados pela ESA, verificados e distribuídos para a comunidade. Os dados apresentam resolução espacial de 0,25° e temporal diária.

4.5.1. Campos Superficiais

Estão presentes da Figura 53 à Figura 56 os campos superficiais de salinidade para os períodos de verão (janeiro a março), outono (abril a junho), inverno (julho a setembro) e primavera (outubro a dezembro) do ano de 2014, respectivamente, apresentando a comparação entre os campos obtidos pelo SMOS e os resultados da modelagem.

Em todas as estações do ano observa-se um padrão semelhante, com baixa variabilidade espacial da salinidade superficial do mar na região oceânica da área de estudo. Já na região costeira o comportamento das bases se diferencia, devido à influência do aporte de água doce dos rios. Observa-se nos resultados da modelagem valores de salinidade próximos a zero na região de desembocadura dos rios, associados à representação dos mesmos, como discutido no item 3.3.3. Porém, a grade de interpolação do satélite SMOS não apresenta resolução espacial suficiente para representar essas feições. Desta forma, os resultados da modelagem representam de forma satisfatória a salinidade do mar, inclusive com e suas feições de menor escala.

⁸ Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) - European Spatial Agency (ESA). Disponível em <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>>. Último acesso em 15/09/2015.

⁹ SMOS Barcelona Expert Centre - CP34-BEC. Disponível em <<http://cp34-bec.cmima.csic.es/>>. Último acesso em 15/09/2015.

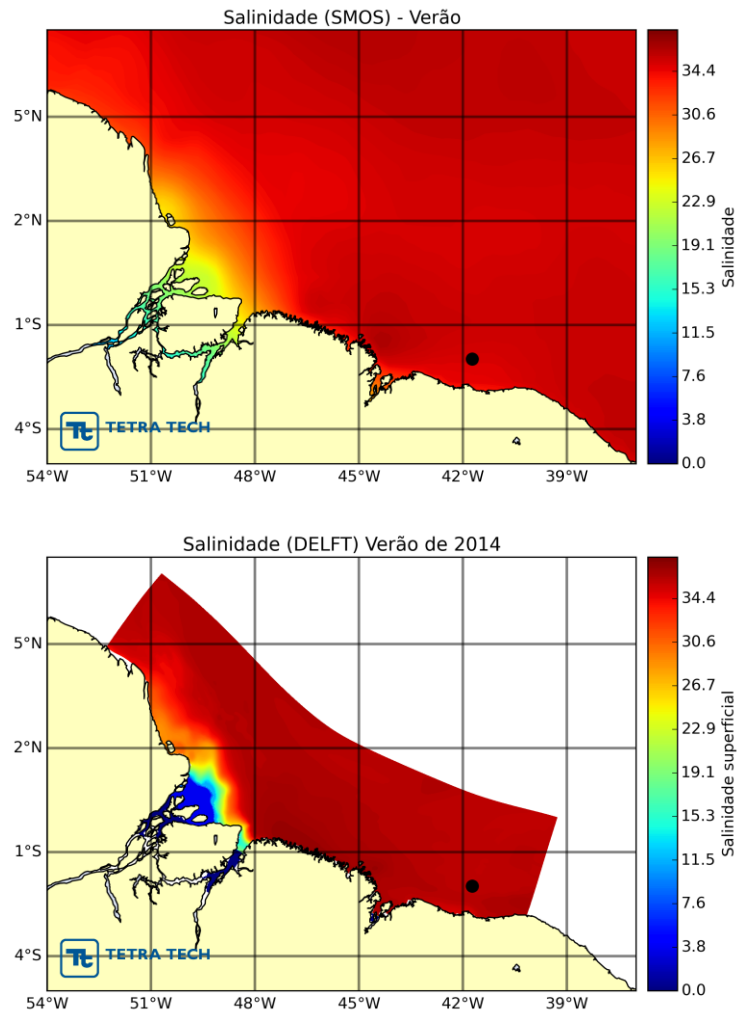


Figura 53 – Campos superficiais de salinidade do mar para o verão de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

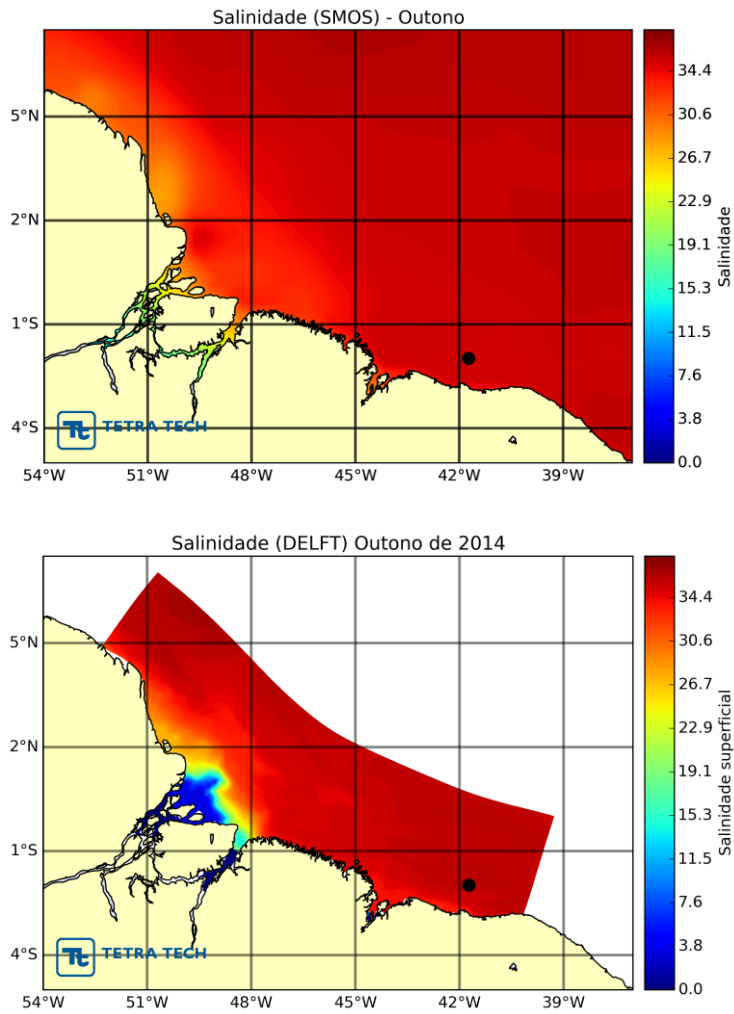


Figura 54 – Campos superficiais de salinidade do mar para o outono de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

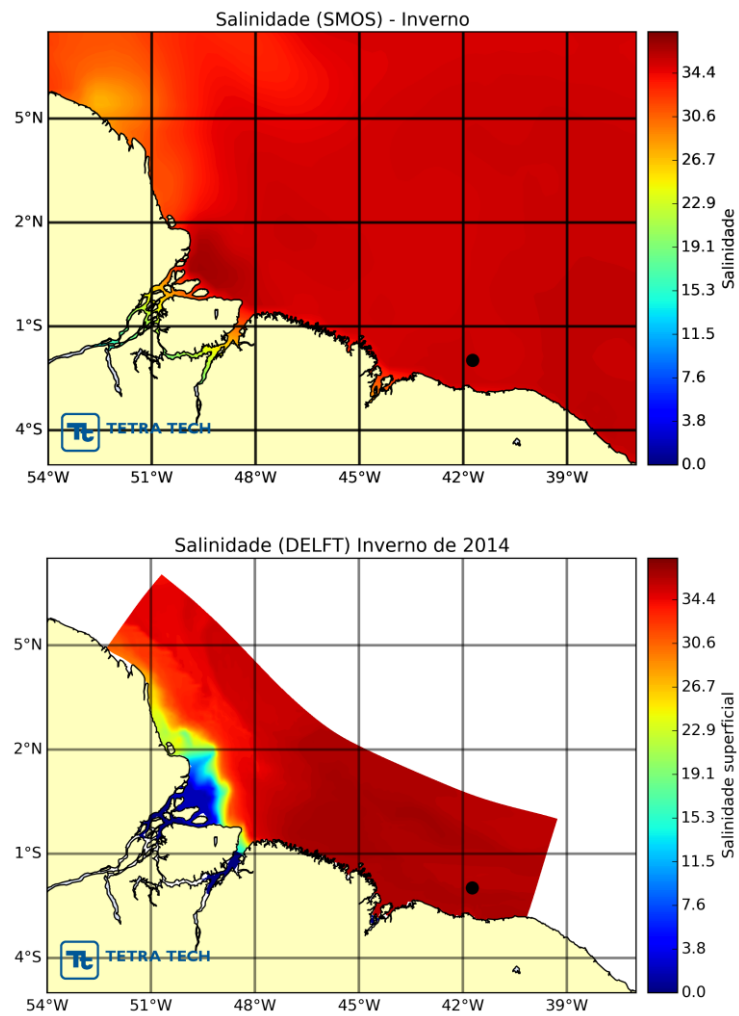


Figura 55 – Campos superficiais de salinidade do mar para o inverno de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

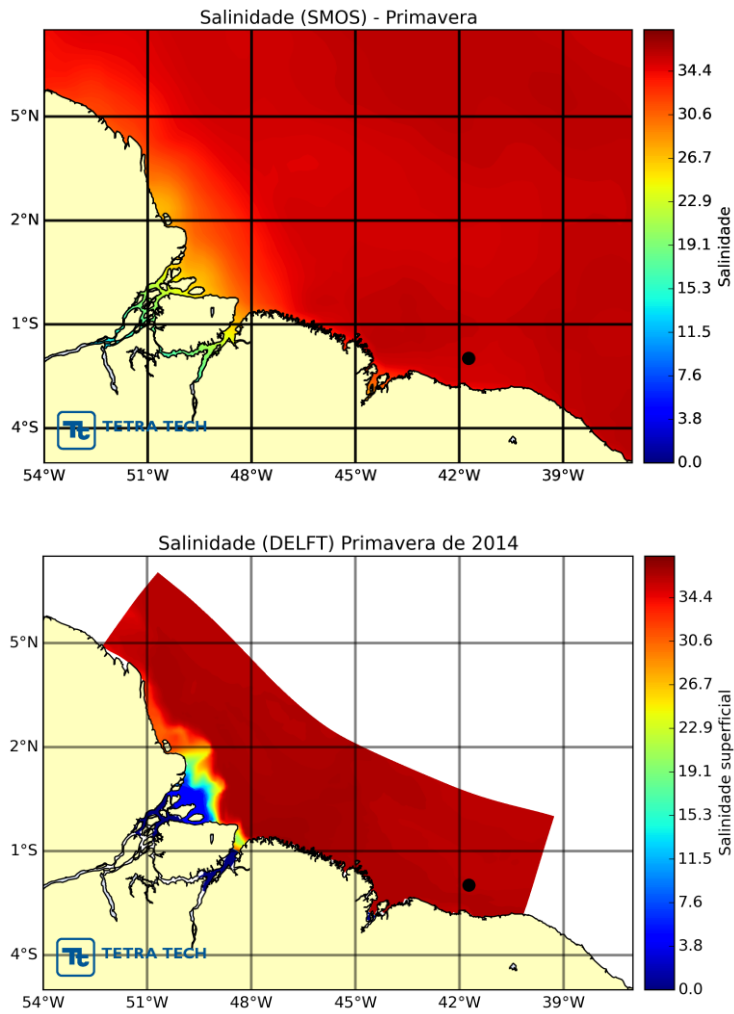


Figura 56 – Campos superficiais de salinidade do mar para a primavera de 2014, a partir dos dados SMOS (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

4.5.2. Perfis Verticais

A análise da variação vertical da salinidade foi realizada através de perfis posicionados no mesmo ponto de análise dos perfis de temperatura apresentados anteriormente, que tem coordenadas 1,98°S e 41,73°W (conforme apresentado na Figura 29). Assim como realizado para a temperatura, os resultados da modelagem numérica foram comparados com a climatologia do WOA-13 para a salinidade, produto disponibilizado pelo NODC (Figura 57).

No ponto analisado (Figura 57), observa-se no conjunto de dados do NODC um aprofundamento da camada de mistura ao longo do ano. No verão e outono a camada de mistura tem profundidade próxima a 100 m, enquanto no inverno e primavera a sua extensão vertical é superior a 100 m, segundo os dados da climatologia. Este comportamento é também identificado nos resultados da modelagem. Observa-se também a capacidade do modelo de representar os padrões verticais de salinidade na região da haloclina (até aproximadamente 500 m) e também em regiões profundas

Os resultados apresentados acima refletem a capacidade do modelo implementado em representar as características de salinidade na área de estudo.

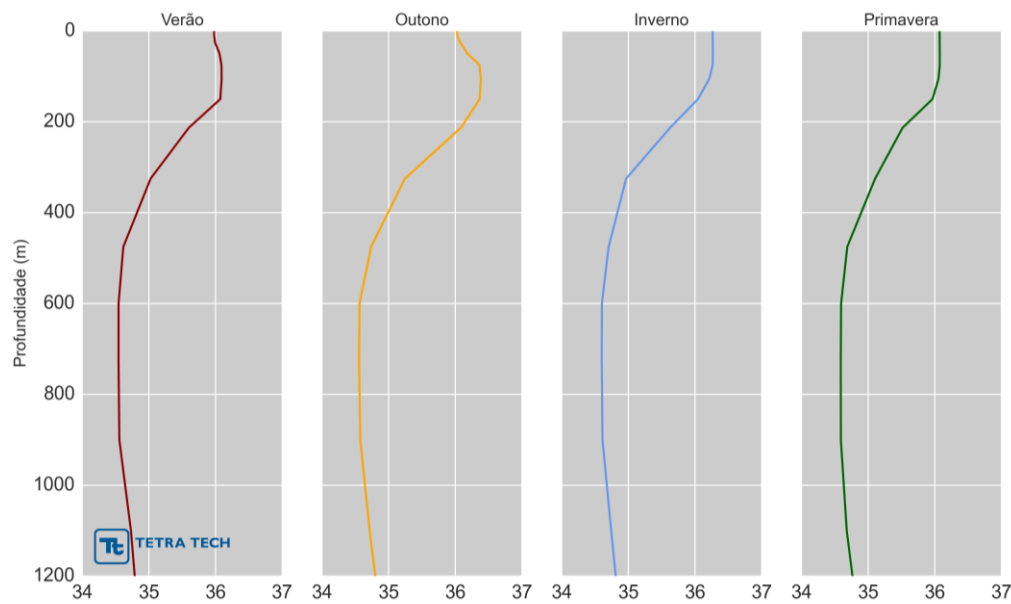
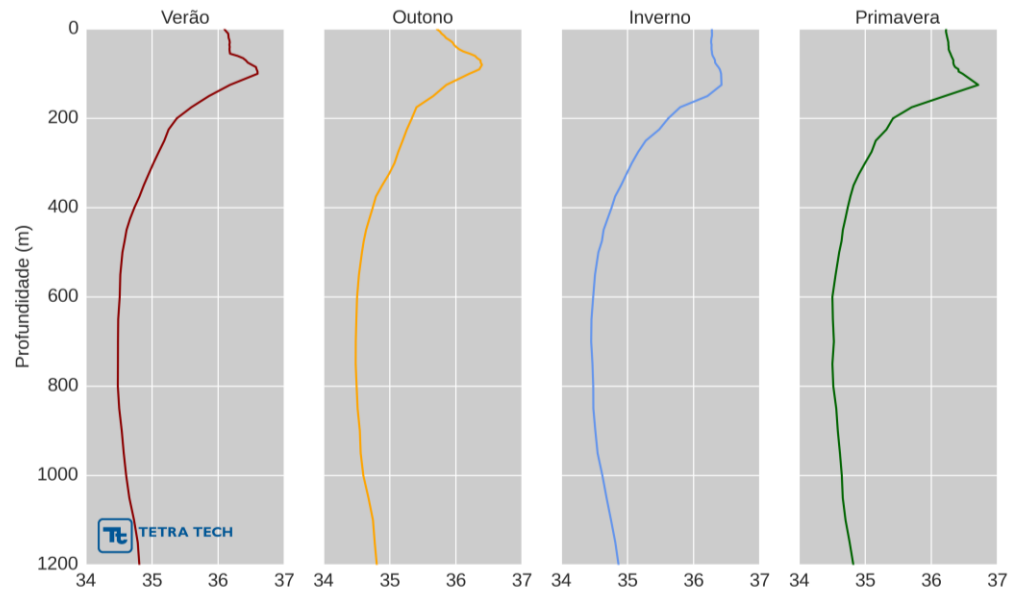


Figura 57 – Perfis verticais sazonais de salinidade no ponto de estudo da BP, a partir dos dados NODC (superior) e resultados da modelagem (inferior). Fonte: TETRA TECH.

5. RESULTADOS PARA MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO E DISPERSÃO DE CASCALHOS

O objetivo principal da modelagem apresentada neste relatório foi gerar uma base hidrodinâmica para a simulação de deriva de óleo e dispersão de cascalhos, que exige além de elevada discretização horizontal e vertical para representar satisfatoriamente a complexa dinâmica da região, um extenso domínio oceânico para permitir a devida adequada do óleo. A base hidrodinâmica foi então gerada a partir do acoplamento entre os modelos Delft3D e HYCOM. O HYCOM foi utilizado não só para representação da área de oceano profundo, como também para fornecer condições de fronteira ao Delft (conforme descrito no item 3.3.1), o que garante um ótimo acoplamento entre os domínios.

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica, através de análises pontuais e de campos superficiais. As análises apresentadas a seguir referem-se aos dois períodos sazonais adotados para simulação: janeiro a junho (representativo da condição de verão), e julho a dezembro (representativo da condição de inverno).

Os campos superficiais obtidos na modelagem hidrodinâmica foram comparados, com campos gerados a partir da base climatológica de derivadores Lumpkin & Garraffo (2005)¹⁰. Os dados que formam a climatologia de corrente nesta base são obtidos por derivadores que pertencem ao Programa de Derivadores de Superfície, uma extensão do Sistema Integrado de Observação dos Oceanos, da NOAA¹¹. O Programa tem por objetivo principal manter rastreadas boias de deriva de superfície, com o intuito de proporcionar um conjunto de dados observados *in-situ* numa abrangência global, bem como proporcionar um sistema de processamento de dados para uso científico, previsões de curto prazo e pesquisas e monitoramento do clima (LUMPKIN & GARRAFFO, 2005). Através dos dados fornecidos pelo programa (Figura 58), foi possível reproduzir campos de correntes próximos à superfície com resolução espacial

¹⁰ A drifter derived climatology of global near-surface currents – NOAA

(http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/drifter_climatology.html). Último acesso em 10 de dezembro de 2012.

¹¹ National Oceanic and Atmospheric Administration <www.noaa.gov>.

de 1 grau. Com esta resolução espacial, o conjunto de dados climatológicos é, portanto, representativo das feições em larga escala, não sendo tão eficiente na descrição de feições sobre a região de plataforma.

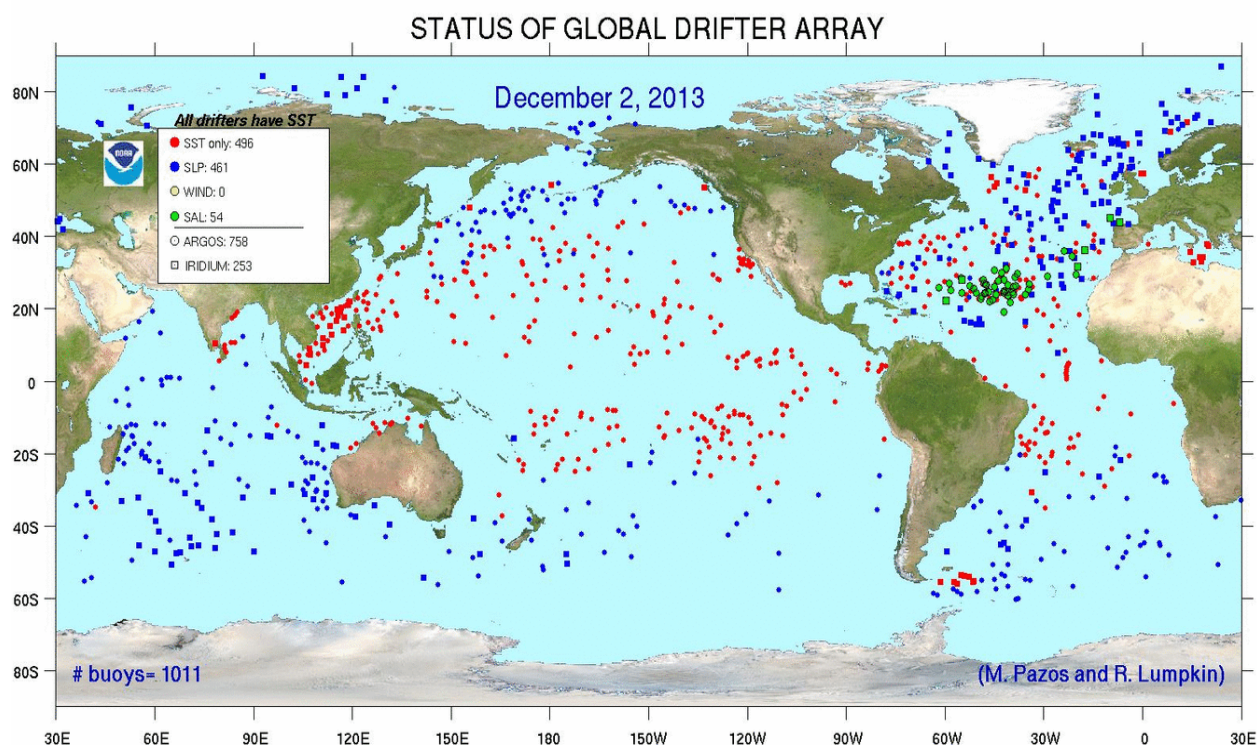


Figura 58 - Representação da população de derivadores mantidos pelo programa da NOAA, ao todo 1.267 derivadores. Fonte: NOAA.

Na Figura 59 e Figura 60 são apresentados os campos superficiais de corrente para os dois períodos simulados obtidos a partir da modelagem numérica e da climatologia de derivadores. Nesta comparação observa-se a boa representatividade dos modelos em reproduzir a circulação predominante na área de oceano profundo, em comparação aos mapas gerados por derivadores nos dois períodos simulados. Nota-se a presença da Corrente Norte do Brasil, corrente oceânica predominante na região, que segue na direção NW sobre a quebra da plataforma continental. Além disso, os modelos reproduzem os meandramentos e a retroflexão da corrente. Observa-se ainda a capacidade do modelo numérico de reproduzir as correntes de maré, dominantes na região da plataforma continental da região Norte do Brasil, tanto na simulação de janeiro à junho, quando na de julho à dezembro.

Esta análise permite ainda constatar que a dinâmica de mesoescala descrita acima foi transmitida adequadamente nas fronteiras oceânicas do Delft3D (acoplamento oceânico com o HYCOM), de forma que este pudesse reproduzir a circulação sobre a plataforma continental e região costeira numa resolução adequada.

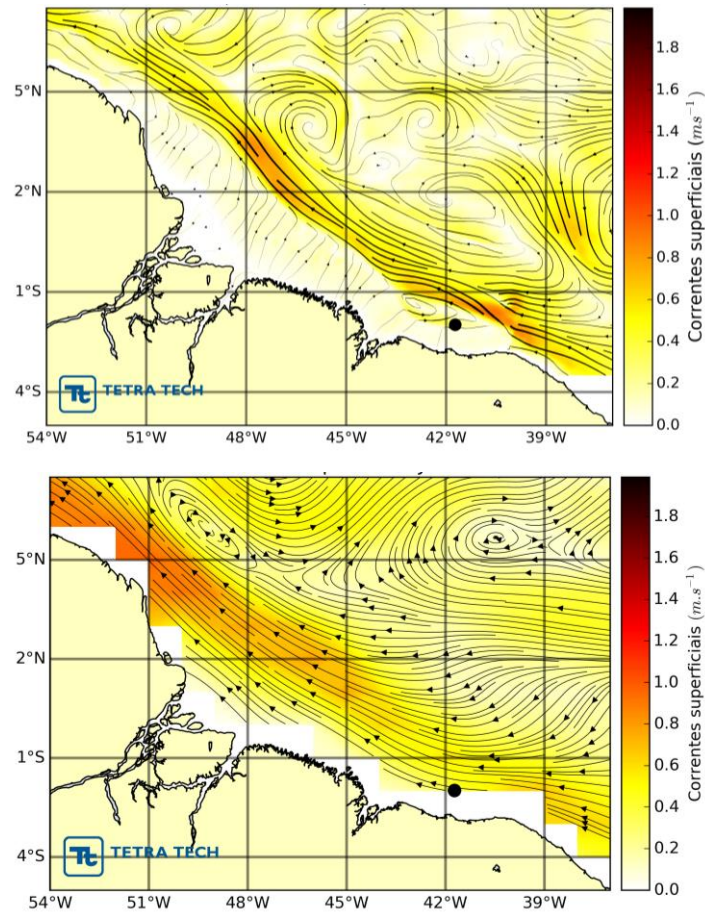


Figura 59 – Campos de corrente superficial para o período de janeiro a junho, a partir de resultados da modelagem (superior) e pela climatologia de derivadores (inferior). Fonte: TETRA TECH.

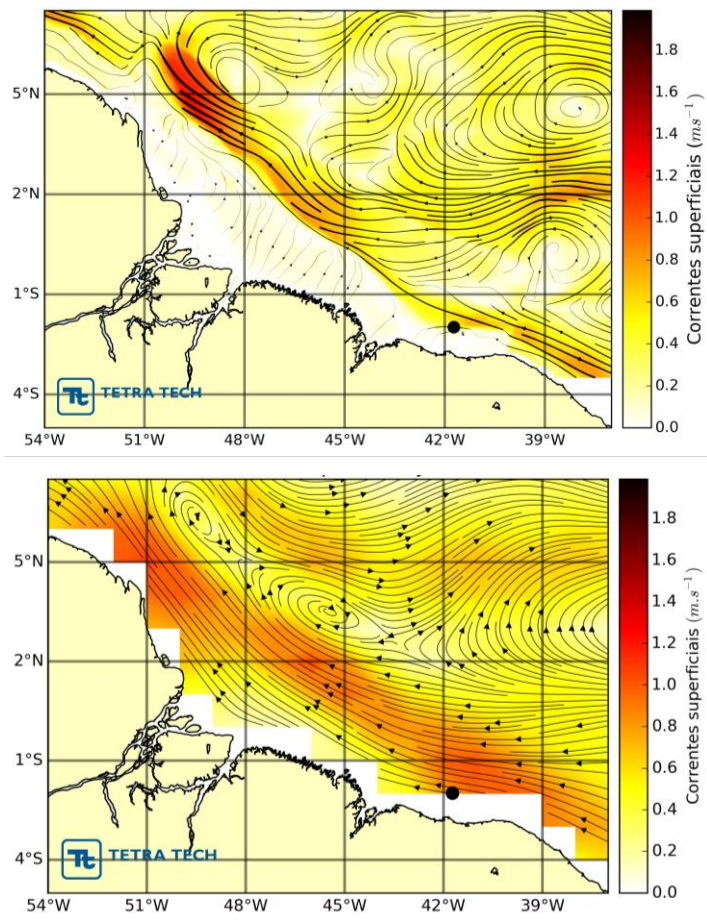


Figura 60 – Campos de corrente superficial para o período de julho a dezembro, a partir de resultados da modelagem (superior) e pela climatologia de derivadores (inferior). Fonte: Tetra Tech.

Adicionalmente, *stickplots*, rosas direcionais e tabelas de ocorrência conjunta de intensidade e direção de correntes foram avaliados na região do Ponto de Produção (ver localização na Figura 29), nas camadas de superfície, meia-água e fundo, para os períodos de simulação representativos do verão e inverno. Os resultados destas análises pontuais são apresentados a seguir.

Na Figura 61 são apresentados *stickplots* das correntes nos três níveis de profundidade (superfície, meio e fundo) para demonstrar o comportamento das correntes na área de estudo no período de simulação de verão. Observa-se, assim como destacado na análise dos campos espaciais, a assinatura da Corrente Norte do Brasil, caracterizada por um fluxo predominante para oeste nas camadas superficiais no

ponto analisado. Inversões na direção da corrente indicam a ocorrência de vórtices e meandros da corrente na Área de Estudo.

Na Figura 62 são apresentadas as rosas de correntes nos três níveis de profundidade no ponto de análise para a simulação do período representativo de verão. A Tabela 14 à Tabela 16 contém os diagramas associados de ocorrência conjunta de intensidade e direção. No Ponto de Produção da BP (Figura 62 e Tabela 14), a corrente segue preferencialmente na direção Oeste, direção registrada em 28,2% das ocorrências. As velocidades, em sua maioria, são de 0,1 a 0,3 m/s (53,9%), com máxima registrada de 1 m/s.

As correntes em níveis intermediários seguem padrões semelhantes aos observados na superfície no período de verão, todavia com menores intensidades associadas e inversões na direção. As direções predominantes neste nível encontradas são W (17,9%) e E (15%). As intensidades mais frequentes observadas são de até 0,2 m/s (67,1%), conforme indicado na Figura 62 e Tabela 15. As máximas atingem 0,8 m/s na direção W.

Na camada de fundo, as intensidades são ainda menores, com a totalidade das observações apresentando velocidades inferiores a 0,2 m/s (Tabela 16). Entretanto, as direções são inversas àquelas descritas para as camadas superiores, uma vez que indicam a assinatura da Corrente de Contorno Profunda. No ponto de estudo, as direções mais frequentes são de E e ESE (38,5%).

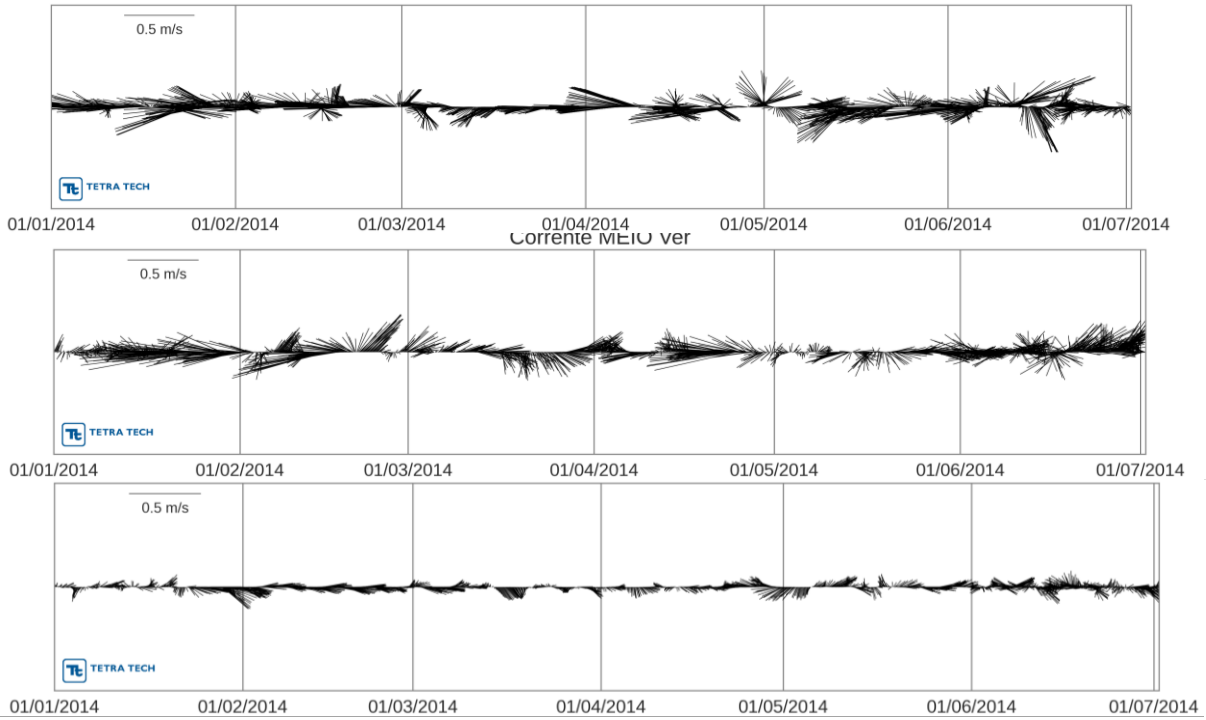


Figura 61 – Stickplots das correntes simuladas no ponto de análise da BP nas camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do verão (janeiro a junho). Fonte: TETRA TECH.

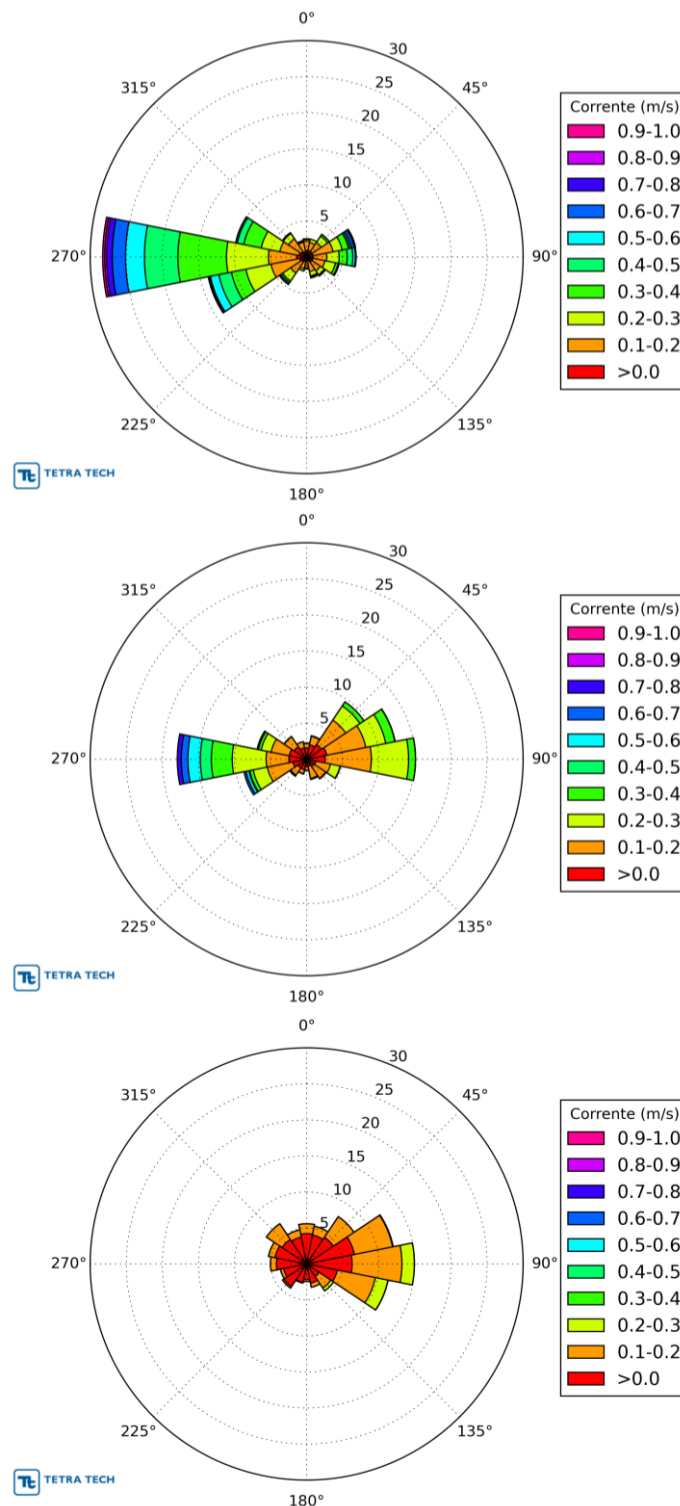


Figura 62 – Rosas de corrente obtidas a partir dos resultados da modelagem nos pontos de análise da BP, camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do verão (janeiro a junho). Fonte: TETRA TECH.

Tabela 14 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de superfície no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0,0-0,1	0.90	0.92	0.88	0.88	0.90	0.86	0.82	0.55	0.37	0.63	0.78	0.98	1.37	1.06	0.88	0.72	13.5
0,1-0,2	1.31	1.13	1.55	2.86	1.88	1.72	1.47	1.49	0.80	1.02	1.86	4.07	3.93	2.74	2.17	1.39	31.4
0,2-0,3	0.23	0.47	1.06	1.27	1.72	1.49	0.67	0.63	0.31	0.31	1.35	3.54	5.81	2.62	0.86	0.14	22.5
0,3-0,4	0.08	0.00	0.29	0.90	1.12	0.37	0.12	0.10	0.08	0.00	0.25	2.03	6.73	2.47	0.14	0.08	14.8
0,4-0,5	0.00	0.00	0.00	0.22	0.78	0.10	0.06	0.14	0.06	0.00	0.22	1.78	4.64	0.92	0.00	0.00	8.9
0,5-0,6	0.00	0.00	0.00	0.23	0.35	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.10	1.19	2.62	0.20	0.00	0.00	4.8
0,6-0,7	0.00	0.00	0.00	0.37	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	1.84	0.00	0.00	0.00	2.5
0,7-0,8	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.76	0.00	0.00	0.00	1.1
0,8-0,9	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.04	0.00	0.00	0.4
0,9-1,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.3
(%)	2.52	2.52	3.78	6.91	6.85	4.58	3.13	2.93	1.66	1.96	4.56	13.91	28.27	10.04	4.05	2.33	
Média	0.13	0.14	0.17	0.25	0.26	0.19	0.16	0.18	0.18	0.13	0.19	0.28	0.36	0.25	0.16	0.13	
Máximo	0.35	0.30	0.37	0.81	0.64	0.52	0.41	0.51	0.53	0.30	0.55	0.80	0.99	0.83	0.39	0.37	

Tabela 15 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada intermediária no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0,0-0,1	1.57	2.03	2.47	2.84	2.56	1.31	1.19	0.94	1.04	1.47	1.45	1.94	2.47	2.47	2.05	1.60	29.4
0,1-0,2	0.61	1.19	4.05	5.52	6.40	2.05	1.98	1.78	0.51	0.57	1.19	3.62	3.15	2.56	1.68	0.86	37.7
0,2-0,3	0.08	0.08	2.37	2.82	5.17	1.35	0.08	0.12	0.04	0.04	0.18	2.00	4.70	1.39	0.04	0.00	20.4
0,3-0,4	0.00	0.00	0.67	1.29	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	2.90	0.39	0.00	0.00	6.7
0,4-0,5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	1.53	0.18	0.00	0.00	1.9
0,5-0,6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	1.72	0.00	0.00	0.00	2.1
0,6-0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.92	0.00	0.00	0.00	1.2
0,7-0,8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.5
(%)	2.25	3.31	9.55	12.50	15.09	4.75	3.25	2.84	1.58	2.07	2.82	8.84	17.92	6.98	3.78	2.47	
Média	0.08	0.09	0.16	0.17	0.18	0.15	0.11	0.12	0.08	0.08	0.10	0.20	0.30	0.16	0.10	0.08	
Máximo	0.22	0.28	0.38	0.40	0.35	0.30	0.21	0.22	0.20	0.20	0.24	0.66	0.80	0.46	0.22	0.18	

Tabela 16 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de fundo no ponto da BP, para o período de janeiro a junho de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0,0-0,1	2.78	2.86	3.95	7.96	9.55	6.77	4.44	2.88	2.66	3.29	3.25	2.54	2.95	2.95	2.62	1.94	63.4
0,1-0,2	0.08	0.12	0.20	3.21	12.42	8.57	2.66	0.16	0.00	0.06	0.76	0.63	3.54	2.50	0.08	0.04	35.0
0,2-0,3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.67	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.6
(%)	2.86	2.97	4.15	11.17	22.52	16.00	7.47	3.03	2.66	3.35	4.01	3.17	6.50	5.46	2.70	1.98	
Média	0.05	0.04	0.05	0.08	0.11	0.11	0.09	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.09	0.09	0.05	0.05	
Máximo	0.11	0.13	0.11	0.17	0.26	0.25	0.23	0.11	0.10	0.11	0.16	0.18	0.18	0.16	0.10	0.10	

O padrão de correntes observado no período de simulação de inverno no ponto de estudo da BP é semelhante ao descrito acima para o período de verão (Figura 63 e Figura 64). Em superfície, as correntes predominantes seguem a direção W, WSW e WNW, com intensidades preferenciais de 0,1 até 0,3 m/s (52,8%), conforme indicado na Tabela 17. Neste período, as velocidades máximas atingem 1 m/s, na direção W.

Na camada intermediária, as direções principais das correntes observadas são WSW e W (36,4%), para o período simulado de inverno. As intensidades, em sua maioria, atingem até 0,2 m/s, com máxima de aproximadamente 0,3 m/s (Tabela 18).

Por fim, as correntes na camada de fundo não ultrapassam 0,3 m/s, com velocidades de 0,1 m/s em sua maioria e direções preferenciais de E e ENE. Estas representam 27,1% dos registros (Tabela 19).

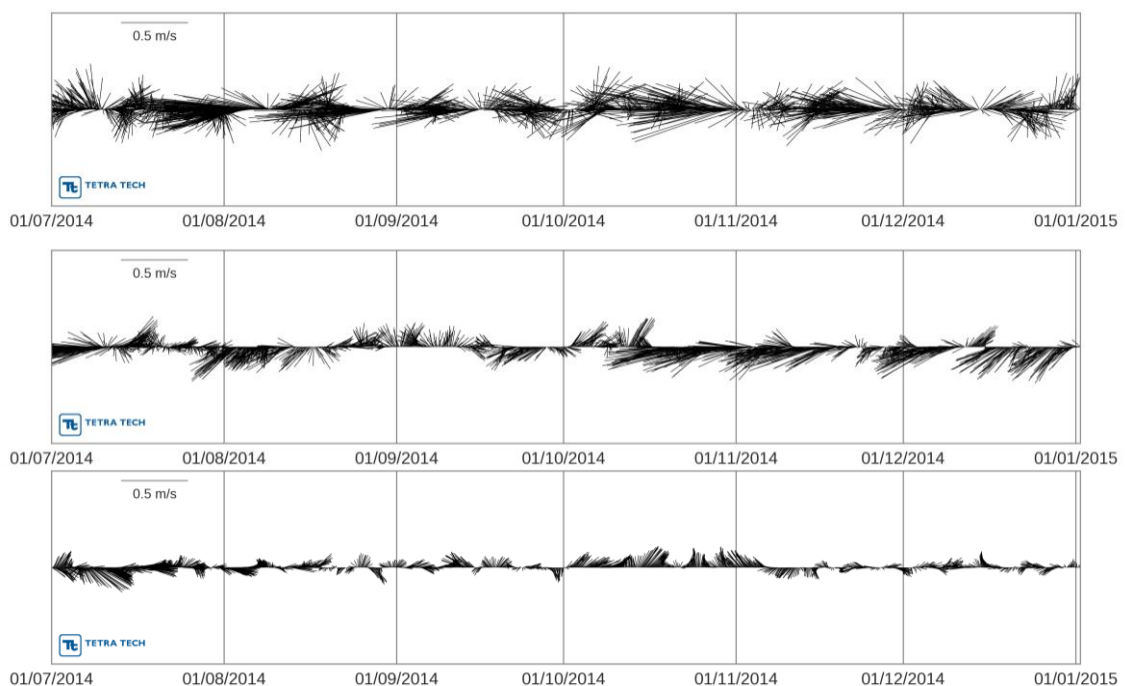


Figura 63 – Stickplots das correntes simuladas no ponto de análise P1 nas camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do inverno (julho a agosto). Fonte: TETRA TECH.

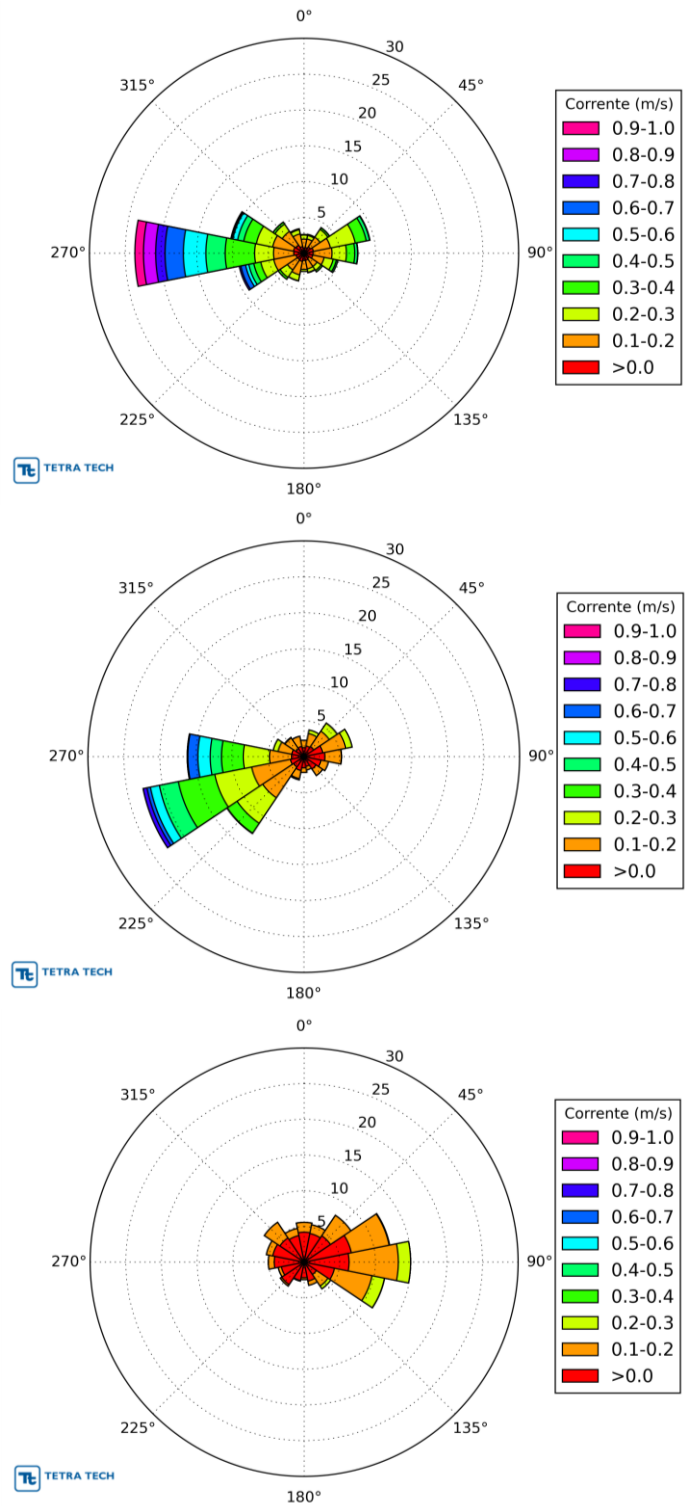


Figura 64 – Rosas de corrente obtidas a partir dos resultados da modelagem nos pontos de análise P1 e P2, camadas de superfície (superior), meio (central) e fundo (inferior), para o período de simulação representativo do inverno (julho a dezembro). Fonte: TETRA TECH.

Tabela 17 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de superfície no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,1	0.72	0.83	1.07	1.33	1.26	1.24	0.85	1.00	1.00	1.15	1.07	1.13	1.41	1.50	1.35	0.96	17.9
0,1-0,2	1.26	1.20	1.63	2.43	2.65	1.63	1.35	1.22	1.26	1.91	1.72	3.18	2.85	2.96	2.31	1.80	31.4
0,2-0,3	0.57	0.50	1.31	3.54	2.02	1.28	0.67	0.48	0.28	0.83	1.24	1.85	2.65	2.33	1.22	0.59	21.4
0,3-0,4	0.07	0.15	0.26	1.57	1.17	0.46	0.24	0.06	0.00	0.04	0.31	1.00	4.11	1.80	0.31	0.13	11.7
0,4-0,5	0.00	0.00	0.02	0.46	0.39	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	2.70	0.87	0.02	0.00	5.4
0,5-0,6	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	3.15	0.69	0.00	0.00	4.4
0,6-0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	2.56	0.17	0.00	0.00	3.4
0,7-0,8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	1.31	0.04	0.00	0.00	1.6
0,8-0,9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	0.07	0.00	0.00	1.8
0,9-1,0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	1.2
(%)	2.63	2.68	4.30	9.39	7.52	4.81	3.11	2.76	2.54	3.93	4.35	9.22	23.64	10.42	5.22	3.48	
Média	0.15	0.15	0.17	0.22	0.21	0.18	0.16	0.13	0.12	0.14	0.17	0.27	0.46	0.26	0.16	0.14	
Máximo	0.36	0.37	0.41	0.51	0.51	0.43	0.34	0.35	0.28	0.31	0.39	0.74	0.98	0.84	0.40	0.35	

Tabela 18 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada intermediária no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,1	1.24	1.52	1.68	2.68	2.93	2.44	2.06	1.39	1.56	1.96	1.72	1.89	1.68	1.70	1.31	1.44	29.2
0,1-0,2	1.04	1.76	2.57	3.26	2.31	1.04	1.09	0.50	0.65	1.15	5.15	5.50	3.07	1.94	1.81	1.43	34.3
0,2-0,3	0.00	0.50	1.33	0.89	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	4.28	5.22	3.65	0.69	0.07	0.02	16.8
0,3-0,4	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.65	5.17	3.04	0.00	0.00	0.00	9.9
0,4-0,5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	2.68	1.56	0.00	0.00	0.00	4.3
0,5-0,6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28	1.72	0.00	0.00	0.00	3.0
0,6-0,7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	1.39	0.00	0.00	0.00	1.9
0,7-0,8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.09	0.00	0.00	0.00	0.6
(%)	2.28	3.78	5.61	6.83	5.26	3.48	3.15	1.89	2.20	3.28	12.85	22.77	16.20	4.33	3.20	2.89	
Média	0.09	0.12	0.15	0.12	0.10	0.08	0.08	0.07	0.08	0.10	0.20	0.29	0.32	0.13	0.11	0.10	
Máximo	0.18	0.26	0.31	0.26	0.21	0.17	0.19	0.19	0.17	0.34	0.42	0.76	0.72	0.28	0.22	0.20	

Tabela 19 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente simulada na camada de fundo no ponto P1, para o período de julho a dezembro de 2014.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,1	4.20	4.09	4.44	6.74	6.30	4.33	2.07	2.70	2.18	2.61	3.78	3.26	4.18	4.48	4.09	3.80	63.3
0,1-0,2	1.37	1.24	3.44	5.41	6.91	5.37	1.94	0.59	0.26	0.09	0.24	0.44	0.83	0.91	2.61	1.02	32.7
0,2-0,3	0.00	0.00	0.00	0.07	1.72	1.78	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.0
(%)	5.57	5.33	7.89	12.22	14.92	11.50	4.48	3.30	2.44	2.70	4.02	3.70	5.02	5.39	6.70	4.81	
Média	0.07	0.08	0.10	0.09	0.12	0.12	0.11	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.07	
Máximo	0.16	0.19	0.19	0.22	0.27	0.30	0.29	0.14	0.13	0.11	0.12	0.15	0.14	0.18	0.17	0.16	

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para dar suporte à BP Energy do Brasil nos estudos ambientais na região do Bloco BAR-M-346 da Bacia de Barreirinhas, a TETRA TECH realizou uma modelagem hidrodinâmica utilizando o modelo Delft3D na região da costa norte do Brasil para o ano de 2014. O principal objetivo foi gerar um campo de correntes adequado para as simulações de deriva de óleo e dispersão de cascalhos nessa região.

Para atendimento que os campos de correntes fossem adequados em relação ao Termo de Referência CGPEG/IBAMA, o domínio temporal da modelagem hidrodinâmica foi estabelecido em dois períodos de seis meses: janeiro a junho (padrão mais representativo do verão) e julho a dezembro de 2014 (padrão mais representativo de inverno). Estes períodos são coerentes com os padrões de variabilidade dos parâmetros oceânicos e meteorológicos apresentados no diagnóstico de meio físico.

Resultados do modelo de larga escala HYCOM foram utilizados para representar a dinâmica de oceano profundo e assim permitir a representação de uma maior extensão espacial do domínio, assim como para gerar condições iniciais e de contorno nas bordas oceânicas, introduzindo os sinais de processos de grande escala nas fronteiras do domínio simulado pelo Delft3D em alta resolução. Este, por sua vez, foi utilizado para representação de forma adequada da complexa dinâmica costeira. Diversas caracterizações e avaliações acerca da implementação do Delft3D e acoplamento com o HYCOM foram realizadas.

A avaliação dos resultados numéricos foi realizada através de comparações com resultados gerados por modelos numéricos, bases de dados históricos e dados coletados *in-situ* obtidos na região de estudo. Os seguintes parâmetros foram analisados neste processo de validação: correntes, elevação (maré), temperatura e salinidade do oceano Atlântico Equatorial. Os dados foram selecionados de acordo com a proximidade da região de interesse e sua disponibilidade.

O modelo foi capaz de simular a elevação do nível do mar no espaço e tempo de forma satisfatória. O mesmo foi capaz de reproduzir tanto a amplitude quanto a fase da maré local, descrita pela previsão harmônica de maré, que foi gerada a partir de constantes em estações da FEMAR.

As correntes oceânicas foram comparadas com campos espaciais gerados por derivadores e dados medidos *in situ*. Tanto espacialmente quanto temporalmente, o modelo foi capaz de reproduzir os processos dominantes na área de estudo, em meso e pequena escala. As comparações com correntes de subsuperfície mostraram a capacidade do modelo em reproduzir a complexa estrutura de cisalhamento vertical de correntes da região.

A análise dos resultados temporais e espaciais (campo superficial e perfil vertical) de temperatura e salinidade, demonstrou o satisfatório desempenho do modelo, como comprovado através da comparação dos resultados com dados observacionais e de sensoriamento remoto (OISST e NODC). Os resultados demonstraram a reprodução dos principais processos oceanográficos da região.

Com base no exposto neste relatório conclui-se que a base hidrodinâmica desenvolvida e implementada pela TETRA TECH, gerada pelo modelo Delft3D acoplado ao modelo HYCOM, consegue representar os principais processos hidrodinâmicos presentes na região de interesse tanto em escala temporal quanto espacial.

7. BIBLIOGRAFIA

BEARDSLEY, R.C. et al. 1995. The M2 tide on the Amazon Shelf. *Journal of Geophysical Research*, v.100, n. C2, p.2283-2319.

BLECK, R. 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, v. 4, n. 1, p. 55-88.

BLECK, R. & BOUDRA, D., 1981. Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate. *Journal of Physical Oceanography*, v. 11, n. 6, p. 755-770.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F.S. & SILVA, M.G.A.J., 2009. Tempo e Clima no Brasil. 463p. Oficina de Textos, São Paulo-SP.

CUMMINGS, J.A., 2005. Operational multivariate ocean data assimilation. *Quart. J. Royal Met. Soc.*, Part C, 131(613), 3583-3604.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

DENGLER, M., F. A. SCHOTT, C. EDEN, P. BRANDT, J. FISCHER & J. ZANTOPP, 2004. Break-up of the Atlantic Deep Western Boundary Current into Eddies at 8° S. *Nature*, Vol. 432, 23/30, p. 1018 -1020.

DE SOUZA, R. K., Modelagem numérica da Circulação de Maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA). Dissertação de mestrado, USP, 2006.

EGBERT, G.D., BENNET, A.F., FOREMAN, G.G., 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.* 99 (C12), 24821–24852.

EPA (Environmental Protection Agency), 2000. Hydrodynamic and Water Quality Model of Christina River Basin. Region III, Philadelphia, PA. Final Report. December 5, 2000.

GILL, A. E., 1982. Atmosphere-Ocean dynamics. International Geophysics Series. Academic Press v. 30.

GODIN, G. 1991. Compact approximation to the bottom friction term for the study of tides propagating in channels. *Continental Shelf Research*. 11(7), p. 579-589.

HALLIWELL, G., 2004. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the hybrid-coordinate ocean model (HYCOM). *Ocean Modelling, Elsevier*, v. 7, n. 3-4, p. 285-322.

HESS, K.W. & BOSLEY, K.T. 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

LANE, A., 1989. The heat balance of the North Sea. Tech. Rep. 8, Proudman Oceanographic Laboratory.

LOCARNINI, R.A. et al. 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. Levitus, S. (Ed.) & Mishonov, A. (Technical Ed.); NOAA Atlas NESDIS 73, 40pp. Disponível em: <http://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA13/DOC/woa13_vol1.pdf> Acesso em: 06 out. 2014.

LUMPKIN, R. AND Z. GARRAFFO, 2005. Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations. *J. Atmos. Oceanic Techn.* 22, 1403-1415.

NOAA-NODC High resolution (1/4 degree) Temperature and Salinity Analyses of the World's Oceans. Version 2. Disponível em: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/qd_ts01.html>. Acesso em 12 de novembro de 2013.

PEREIRA, J.E.R. 2000. Identificação de Sistemas Ressonantes: Aplicação na Plataforma Amazônica. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da USP, 260pp.

REYNOLDS, R. W., T. M. SMITH, C. LIU, D. B. CHELTON, K. S. CASEY & M. G. SCHLAX, 2007. Daily High-resolution Blended Analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496. Disponível em < ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/NetCDF/> Acesso em 09 de outubro de 2012.

SAHA and Coauthors, 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185–2208. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

SATYAMURTY P, MATTOS LF, NOBRE CA & SILVA DIAS PL. 1998. Tropics - South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Ed. Kauly, D. J. and Vincent, D. G., Meteorological Monograph. *American Meteorological Society*, Boston, 119-139.

SILVEIRA, I.C.A. DA; MIRANDA L.B. DE; BROWN, W.S., 1994. On the origins of the North Brazil Current; *J. Geophys. Res.*, 99, 22501-22512

SPIEGEL, M.R. & STEPHENS, L. J. 1999. *Theory and Problems of Statistics*. McGraw-Hill – New York. 538 pp.

STARK, J.D. et al. 2007 OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. In: *Oceans '07 IEEE, 2007, Aberdeen, Escócia. Proceedings. Aberdeen, Scotland: IEEE, 2007.*

STRAMMA, L. & M. ENGLAND, 1999. On the water masses and circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, Nº. C9: 20.863-20.883.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y. & PETERSEN, R.G., 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, *Deep-Sea. Res.*, 37(12): p. 1875-1886.

SVERDRUP, H.U., JOHNSON, M.W. FLEMING, R.H., 1942 The Oceans: their physics, chemistry and general biology. Prentice-Hall, INC (New York)

TOMCZAK, M. & GODFREY, J.S., 2001 Regional oceanography: An introduction, Pergamon (Oxford), p. 422

ZWENG, M.M; REAGAN, J.R.; ANTONOV, J.I.; LOCARNINI, R.A.; MISHONOV, A.V.; BOYER, T.P.; GARCIA, H.E.; BARANOVA, O.K.; JOHNSON, D.R.; SEIDOV, D. & BIDDLE, M.M., 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. Levitus, S. (Ed.) & Mishonov, A. (Technical Ed.); NOAA Atlas NESDIS 74, 39pp. Disponível em: <http://data.nodc.noaa.gov/woa/ WOA13/DOC/woa13_vol2.pdf >. Acesso em: 15 set. 2015.

WALSTRA. L.C., VAN RIJN. L.C.. BLOGG, H.. e VAN ORMONDT. M. 2001. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. Report TR121 - EC MAST Project No. MAS3- 0197-0086. HR Wallingford, UK."

WILLMOTT C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. American Meteorological Society Bulletin, 1309-1313.

WOA01 - Methods. Acesso em 12 de novembro de 2013. Disponível em: <<ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/woa/PUBLICATIONS/qdegmethod.pdf>>

8. EQUIPE TÉCNICA

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa
Registro no Conselho de Classe	1.609 (AOCEANO)
CPF	216.695.528-29
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Bruno Scherr Martins
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	121.680.647-09
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Engenheiro Mecânico
Registro no Conselho de Classe	060.184.738.5 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Físico
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	188.764.658-20
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	5069291950 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Ricardo O. Busoli
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	184.317.508-80
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Ronaldo M. de Jesus Palmeira
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	20000103620 (CREA-RJ)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	434269
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Tito Conte
Empresa	Tetra Tech Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafo
Registro no Conselho de Classe	000.000.000-0
CPF	391.812.538-69
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

ANEXO 1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D

O sistema de modelos Delft3D (DELTA RES, 2013) é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema pode atualizar a cada passo de tempo as cotas batimétricas decorrentes de alterações geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água).

A seguir, são descritas as principais características do modelo, através de seu módulo hidrodinâmico.

1. DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW

Para resolver o problema de hidrodinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação do campo de correntes e elevação de nível da superfície d'água) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, optou-se pela utilização do modelo Delft3D.

A possibilidade de se trabalhar com grades altamente ajustáveis aos contornos foi a característica determinante para a escolha deste modelo. A acomodação da grade numérica à linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além da utilização das aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

A grade implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos dinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

1.1 Processos Físicos

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais da quantidade de movimento, na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- O Delft3D permite que se adote o sistema de coordenadas sigma (σ) ou coordenadas Z no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas tornam-se válidas e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;
- O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- Utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas, não considerando o efeito da curvatura da Terra. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme;
- Assume-se uma condição de deslizamento no fundo (*slip boundary condition*) e é aplicada uma formulação de segunda ordem (quadrática) ao cisalhamento no fundo;

- A formulação para a tensão de cisalhamento no fundo devido à ação conjunta das ondas e correntes é baseada num campo de fluxo 2D, gerado a partir da velocidade próxima ao fundo, utilizando uma aproximação logarítmica;
- As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver as escalas turbulentas (*large eddy simulation*). No entanto, as grades são geralmente muito grosseiras para resolver estas flutuações. Desta forma, as equações utilizadas são baseadas nas tensões de Reynolds;
- No Delft3D-FLOW os vórtices turbulentos são definidos pela profundidade da água. Sua contribuição à troca vertical da quantidade de movimento horizontal e da massa é modelada através de um coeficiente de viscosidade vertical turbulenta e difusividade turbulenta. Assume-se que os coeficientes são proporcionais à escala de velocidade e comprimento. Os coeficientes devem ser especificados (valor constante) ou computados por modelos algébricos, de turbulência k-L ou k- ϵ , onde k representa a energia cinética turbulenta, L é o máximo comprimento e ϵ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;
- Em concordância com a razão de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário¹². A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;
- Uma célula é considerada “seca” quando os quatro pontos de velocidade nas extremidades da célula secarem, ou quando a profundidade da água no centro da célula for menor que zero (volume negativo);
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- Quando não é especificado o campo de temperaturas, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.
- Se a troca de calor com a superfície da água é computada, utilizando um modelo de temperatura, o coeficiente de troca é função da temperatura e da velocidade do

¹² Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

vento e, é determinado de acordo com Sweers (1976). Assume-se que a temperatura do ambiente é constante no espaço e pode variar no tempo. Em outras formulações de troca de calor, os fluxos devido à radiação solar, atmosférica e radiação de fundo, convecção e perdas de calor devido à evaporação são modelados separadamente;

- O efeito da precipitação na temperatura da água é representado.

No próximo subitem, são apresentadas as equações básicas que governam o modelo implementado.

1.2 Equações Básicas

O modelo adotado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e de Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

O Sistema de Coordenadas Sigma (σ)

O sistema de coordenadas sigma (σ) foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos σ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações da batimetria e do nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (Figura A-1).

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme. Esta propriedade permite maior resolução nas áreas de interesse, como em regiões superficiais (importante para fluxos devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e áreas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).

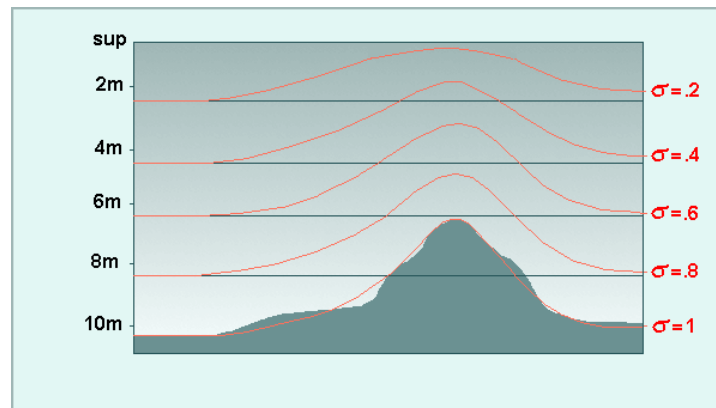


Figura 1 - Exemplo de uma aplicação de coordenadas.

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (1)$$

onde:

z a coordenada vertical no espaço físico;

ζ a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ($z = 0$);

d profundidade abaixo do plano de referência;

H profundidade local total ($H = d + \zeta$).

No sistema de coordenadas σ , a coordenada vertical no fundo é definida como $\sigma = -1$, e na superfície como $\sigma = 0$ (ver Figura A-1). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas σ após modificações (“regra da cadeia”) e termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal de uma área restrita (limitada) composta de contornos abertos e fechados (terra) e vertical (número de camadas). No sistema de coordenadas σ o número de camadas é constante em todos os locais do plano horizontal. Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (2)$$

onde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

ξ, η coordenadas no sistema cartesiano;

U, V velocidades médias (na vertical) nas direções ξ, η

Q representa as contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (3)$$

onde:

q_{in} fonte de água por unidade de volume;

q_{out} sumidouro de água por unidade de volume;

P precipitação;

E evaporação.

A tomada d'água de uma usina, por exemplo, deve ser modelada como um sumidouro. Na superfície pode haver uma fonte devido à precipitação ou um sumidouro devido à evaporação.

Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções ξ e η , são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (4)$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (5)$$

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas (P_ξ e P_η). As forças F_ξ e F_η , nas equações acima, representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds, enquanto M_ξ e M_η representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros).

Velocidades Verticais

A velocidade vertical (ω) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas σ :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (6)$$

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em conta. A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ . A velocidade vertical (ω) é referente ao movimento em σ , e pode ser interpretada como a velocidade associada aos movimentos de subida e descida. As velocidades verticais w (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são consideradas nas equações do modelo e são computadas apenas para fins de pós-processamento. Estas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais (u e v),

profundidade da coluna d'água (H), elevação do nível d'água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (7)$$

Pressão hidrostática

Ao se adotar a aproximação das equações de águas rasas para o sistema em estudo, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (8)$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad (9)$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (11)$$

Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis (f) depende da latitude geográfica (ϕ) e da velocidade angular de rotação da Terra (Ω). Portanto,

$$f = 2\Omega\sin\phi \quad (12)$$

Tensões de Reynolds

As forças F_ξ e F_η nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta, e pode ser observada em maiores detalhes em Rodi (1984). Dento deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Considerando águas rasas, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta (ν_H) é muito maior de que sua contra parte vertical (ν_V). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes:

1. uma parte devido a “turbulência de escala subgrade”;
2. uma parte devido a “turbulência tridimensional (3D)”;
3. uma parte devido a dispersão, para simulações representando médias na coluna d’água.

Em simulações onde as equações de quantidade de movimento e transporte são médias na coluna d’água, a distribuição da quantidade de movimento e material devido à variação vertical da velocidade horizontal, é denominada dispersão. Como o perfil vertical da velocidade horizontal não é resolvido nas simulações 2D, a dispersão não é simulada. O efeito dispersivo pode ser modelado como o produto do coeficiente de viscosidade e o gradiente de velocidade. O termo dispersivo pode ser estimado pela formulação de Elder.

Se o perfil vertical da velocidade horizontal não se aproximar de um perfil logarítmico (devido à estratificação ou a forçante do vento), recomenda-se utilizar um modelo 3D para o transporte de materiais.

A viscosidade turbulenta na horizontal é principalmente associada à contribuição dos movimentos turbulentos na horizontal e forçantes não resolvíveis na malha horizontal (“turbulência de escala subgrade”) ou por equações de águas rasas com médias de Reynolds. É introduzida a viscosidade turbulenta na horizontal na escala de subgrade (v_{SGS}) e a viscosidade turbulenta na horizontal (v_H^{amb}). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada *Horizontal Large Eddy Simulation (HLES)*. O v_{SGS} será computado por um modelo de turbulência.

A viscosidade horizontal do meio, definida pelo usuário é representada pela v_H^{amb} . Consequentemente, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulento na horizontal é definido por:

$$v_H = v_{SGS} + v_V + v_H^{amb} \quad (13)$$

A parte v_V se refere à turbulência tridimensional e, nas simulações 3D, é computada a partir de um modelo de fechamento turbulento 3D.

Para modelos de fechamento turbulento que respondem apenas ao cisalhamento gerado, é conveniente especificar um coeficiente de mistura vertical de forma a contabilizar outras formas de mistura não resolvíveis, (v_V^{amb}). Por isso, além de todos os modelos de fechamento turbulento, no Delft3D-FLOW deve-se especificar uma constante (no espaço e no tempo) que represente o coeficiente de mistura do ambiente (valor referente à viscosidade turbulenta na vertical das equações de quantidade de movimento). Consequentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb}) \quad (14)$$

onde v_{mol} é a viscosidade cinemática da água. A parte v_{3D} é computada através de um modelo de fechamento turbulento.

A fim de modelar o fluxo secundário em simulações 2D em curvas de rios, o Delft3D-FLOW contém uma formulação para levar em conta o efeito do movimento

espiral. Assim, a tensão de cisalhamento na horizontal é estendida considerando um termo adicional.

O sistema de coordenadas σ rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica na adição de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). Então, as forças F_ξ e F_η são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad (15)$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (16)$$

Para fluxos em pequena escala, quando o cisalhamento nos contornos fechados precisar ser levado em conta, os tensores de cisalhamento $\tau_{\xi\xi}, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\eta\xi}, \tau_{\eta\eta}$ são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad (17)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad (19)$$

Para simular fluxos em larga escala, com grades horizontais grosseiras, quando o cisalhamento nos contornos fechados puder ser negligenciado, as forças F_ξ e F_η são simplificadas. Os termos de viscosidade horizontal, no Delft-FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_{\xi} = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (20)$$

$$F_{\eta} = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (21)$$

Onde se assume que a viscosidade turbulenta é constante.

Equação de Estado

A densidade da água (ρ) é uma função da salinidade (s) e da temperatura (t). O modelo Delft3D utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad (22)$$

onde:

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745t^2 - (3,80 + 0,01 t) s$$

$$\alpha_o = 0,6980$$

$$P_o = 5890 + 38 t - 0,375t^2 + 3 s$$

com a salinidade (s) em ‰ e a temperatura da água (t) em °C.

2 BIBLIOGRAFIA

BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L., 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, 113(8).

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 256, 225-240.

PHILLIPS, N.A., 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. of Meteorology*, vol. 14.

RODI, W. 1984. Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'etat de connaissance. IAHR paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands.

STELLING, G.S. & VAN KESTER, J.A.TH.M., 1994. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 18, 915-955.

SWEERS, H.E. 1976. A nomogram to estimate the heat exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, Vol. 30:4, 375-401.



ANEXO D – TABELAS COM O RESUMO DOS RESULTADOS PROBABILÍSTICOS POR UNIDADE DE CONSERVAÇÃO

Este anexo apresenta o resumo de todos os resultados probabilísticos na forma de tabelas, para os resultados probabilísticos considerando as unidades de conservação (UC) com probabilidade de chegada de óleo a partir do óleo presente na superfície da água. Para extrair as estatísticas da chegada do óleo nas unidades de conservação, as mesmas foram divididas em unidades de conservação marinha e costeira.

As unidades marinhas são representadas pela UCs cujas áreas abrangem uma extensão do mar. E as unidades costeiras, pelas UCs cujas áreas limitam-se a parte terrestre do litoral. Desta forma, se unidade de conservação abranger uma parte terrestre do litoral e mais uma extensão do mar, ela será considerada marinha.

Ressalta-se que, neste estudo em particular, não se observou nenhuma unidade de conservação costeira, segundo os critérios supracitados. Sendo que as informações para as unidades de conservação marítimas foram obtidas através de pós-processamento dos *shapes* de probabilidade, tempo e massa na superfície da água, uma vez que o modelo OSCAR somente estima a interação do óleo presente na superfície da água com a linha de costa.

As tabelas apresentam as seguintes informações: maior probabilidade de toque na UC, menor tempo de toque na UC, massa máxima de óleo por km de UC e área da UC atingida.

Na Figura D-1 são apresentadas todas as unidades de conservação que apresentaram probabilidade de chegada do óleo.

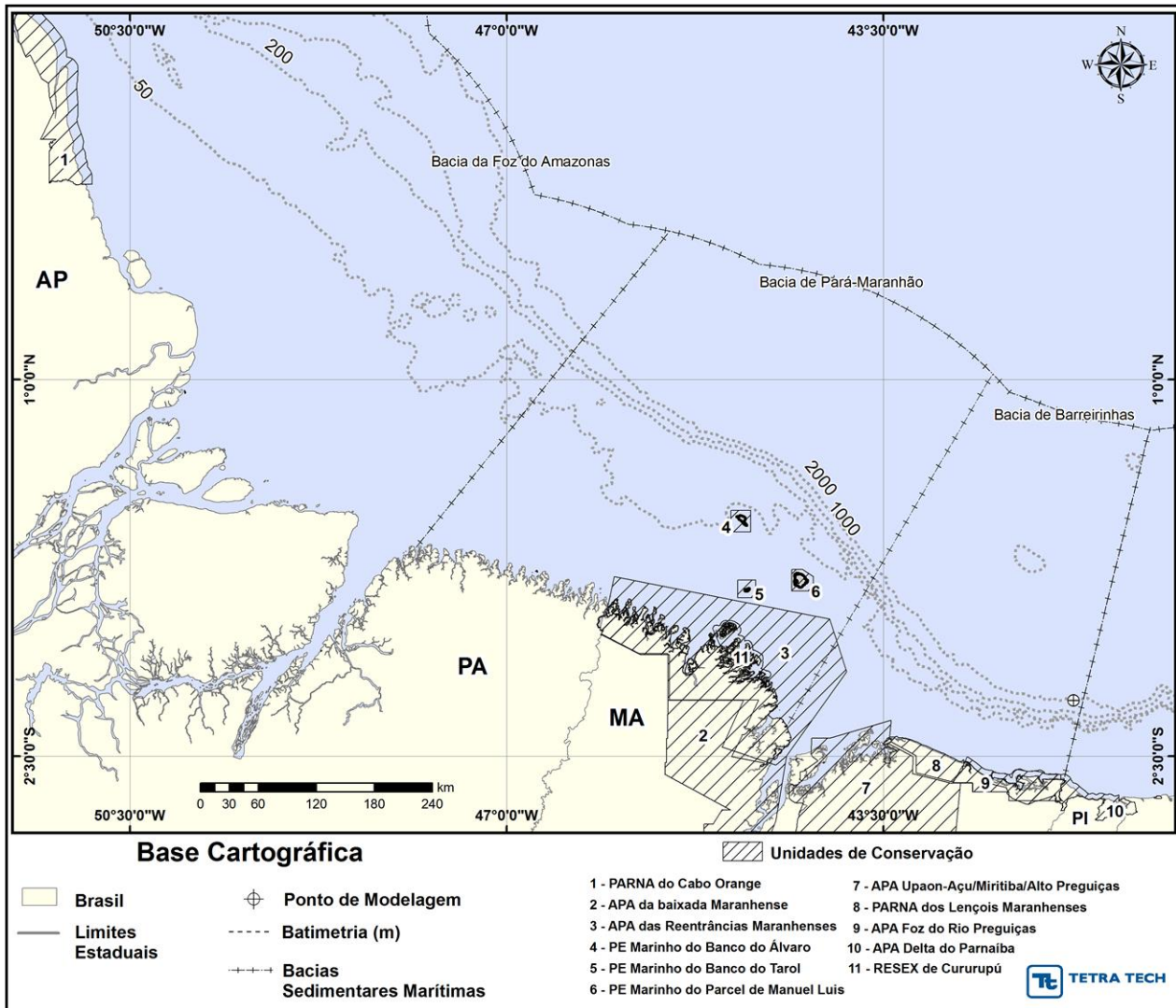


Figura D-1- Unidades de conservação que apresentaram probabilidade de chegada do óleo.

A seguir, são apresentadas as tabelas com as estatísticas da chegada do óleo nas unidades de conservação, para o período de janeiro a junho e julho a dezembro.



Tabela D-1- Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para as unidades de conservação com probabilidade de chegada do óleo, período de janeiro a junho, com derrame de volume de 50.720,1 m³, para o Bloco BAR-M-346.

UF	UNIDADE DE CONSERVAÇÃO	PROBABILIDADE DE ÓLEO NA COSTA (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)	MASSA MÁXIMA NA COSTA (ton./km)	ÁREA (km ²)
MA	PE Marinho Banco do Tarol	4,8	580	8,8667	341,76
	PE Marinho Banco do Álvaro	16,7	296	9,0703	451,13
	PE Marinho do Parcel de Manuel Luis	19,7	284	8,9472	451,01
	PARNA dos Lençóis Maranhenses	78,0	169	195,7066	243,12
	RESEX de Cururupu	10,0	475	8,7891	359,89
	APA Upaon-Açu/Miritiba/Alto Preguiças	49,8	252	195,7066	1077,95
	APA das Reentrâncias Maranhenses	23,5	322	10,1540	9022,34
PI	APA da Foz do rio Preguiças/Pequenos Lençóis e Região Lagunar Adjacente	80,0	176	650,4063	485,16
CE	APA Delta do Parnaíba	9,5	372	8,9283	240,81

Tabela D-2- Resumo dos resultados das simulações probabilísticas para as unidades de conservação com probabilidade de chegada do óleo, período de julho a dezembro, com derrame de volume de 50.720,1 m³, para o Bloco BAR-M-346.

UF	UNIDADE DE CONSERVAÇÃO	PROBABILIDADE DE ÓLEO NA COSTA (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE NA COSTA (horas)	MASSA MÁXIMA NA COSTA (ton./km)	ÁREA (km ²)
MA	PE Marinho Banco do Tarol	8	830	8,3969	341,76
	PE Marinho Banco do Álvaro	50	282	10,4941	451,13
	PE Marinho do Parcel de Manuel Luis	40	277	15,3660	451,01
	PARNA dos Lençóis Maranhenses	10	251	34,2297	230,47
	RESEX de Cururupu	10	396	13,9854	721,39
	APA Upaon-Açu/Miritiba/Alto Preguiças	18	239	20,5080	1029,98
	APA da Baixada Maranhense	10	467	9,0299	179,94
	APA das Reentrâncias Maranhenses	41	299	24,8033	10655,12
PI	APA da Foz do rio Preguiças/Pequenos Lençóis e Região Lagunar Adjacente	9	347	8,6355	114,15
CE	APA Delta do Parnaíba	1	949	1,5178	0,46



ANEXO E – ANÁLISE DE FREQUÊNCIA PARA OS PERÍODOS DAS SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS CRÍTICAS

A seguir, são apresentadas análises da frequência de ocorrência de ventos e correntes durante o período de simulação para cada cenário determinístico de menor tempo de toque, de maior massa e de menor distância da costa.

São apresentadas as análises para 8 cenários, sendo que para cada cenário os sufixos JFMAMJ e JASOND indicam, respectivamente, os períodos de simulação janeiro a junho (representativo da condição de verão) e julho a dezembro (representativo da condição de inverno).

As análises são apresentadas através de rosas dos ventos e das correntes e tabelas de ocorrência conjunta de intensidade e direção no ponto de grade representativo das características do ponto de modelagem (01°59'12,25" S, 041°43'50,47" W) em cada uma das bases de dados.

Os dados de vento são avaliados a partir da reanálise do CFS-v2 e as correntes superficiais a partir do modelo DELFT3D implementado pela TETRA TECH. As rosas dos ventos seguem a convenção meteorológica, indicando a direção de incidência dos ventos, enquanto os de corrente seguem a convenção oceanográfica, portanto, indicando a direção de fluxo. A frequência de ocorrência é apresentada pela distância radial (%) e a escala de cores representa a velocidade de ventos ou correntes (m/s). A Tabela E1 apresenta a identificação e as datas inicial e final de cada um dos cenários analisados.

Tabela E1 – Identificação e datas inicial e final dos cenários analisados.

CENÁRIO	DATA INICIAL	DATA FINAL
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_JFMAM	14/01/2014	14/03/2014
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_JFMAM	18/04/2014	18/06/2014
DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_JASOND	26/08/2014	26/10/2014
DET_MASSA_BAR_M_346_PC_JASOND	08/09/2014	08/11/2014
DET_DIST_BAR_M_346_8_JASOND	18/11/2014	19/12/2014
DET_DIST_BAR_M_346_200_JASOND	10/11/2014	11/12/2014
DET_DIST_BAR_M_346_8_JFMAMJ	09/05/2014	10/06/2014
DET_DIST_BAR_M_346_200_JFMAMJ	19/02/2014	20/03/2014

E.1 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS DE MAIOR MASSA

A Figura E1 apresenta as rosas dos ventos para os cenários de maior massa na costa para os períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita). Em ambos os períodos os ventos predominantes são de direção leste, influenciados pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sendo que no período de inverno são observados ventos mais intensos. A Tabela E1 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos para o período de verão, onde se observa que as direções mais frequentes são de E (44,8%) e ENE (29,8%) e a faixa de intensidades mais frequente ocorre entre 4 m/s e 8 m/s. As máximas intensidades são associadas à direção ESE, atingindo até 10,8 m/s. No inverno os ventos mais frequentes são de E (62,9%) e ENE (19,8%), com velocidades mais frequentes entre 10 m/s e 14 m/s e máxima de 14,5 m/s ocorrendo na direção de E.

A Figura E2 apresenta as rosas de correntes para os cenários de maior massa na costa para os períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita). Em ambas as estações as correntes predominantes são para W, indicando a predominância da Corrente Norte do Brasil na região. A Tabela E3 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção das correntes para o verão, apresentando correntes predominantes para W (19,7%) e ENE (12,98%), com velocidades mais frequentes abaixo de 0,4 m/s e velocidade máxima de 0,8 m/s ocorrendo para WSW. A Tabela E4 mostra o análogo para o inverno, onde se observam correntes predominantes para W (26,41%) e WMW (12,16%), com velocidades predominantes também abaixo de 0,4 m/s e máxima de 0,84 m/s na direção WSW.

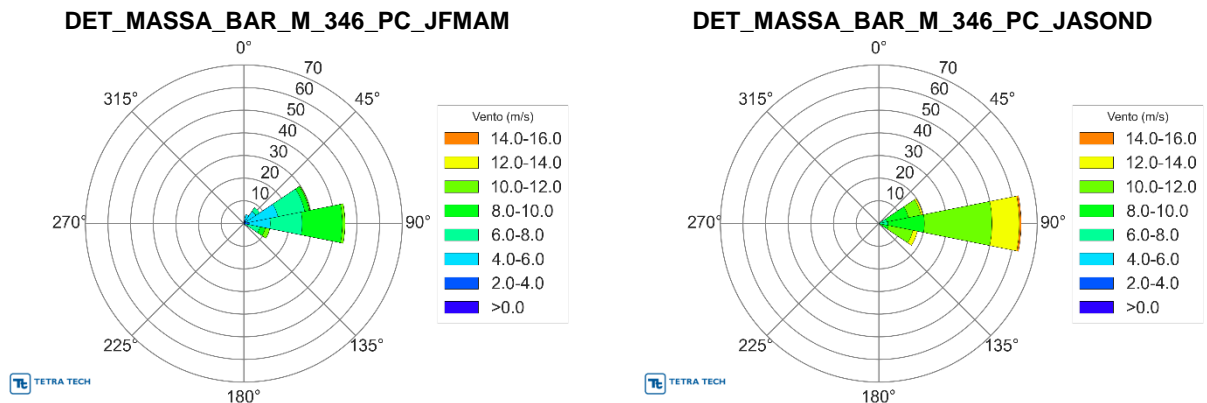


Figura E1 – Rosas de vento a partir dos dados da reanálise CFSv2 para os cenários determinísticos de maior massa na costa. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

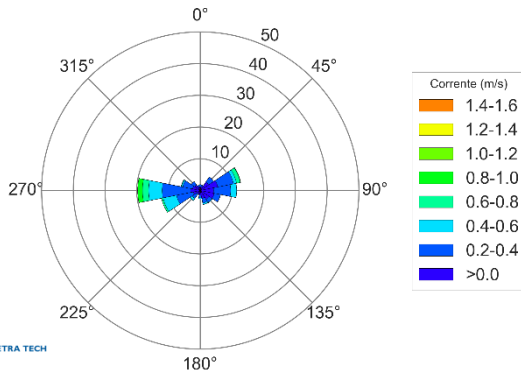
Tabela E1 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de maior massa na costa, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,40	1,61	1,21	1,21	2,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,9
4,0-6,0	0,00	2,42	5,24	14,11	9,27	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,3
6,0-8,0	0,00	0,00	2,02	12,10	14,11	6,05	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,7
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	2,02	17,74	2,42	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,6
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	0,40	1,21	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,6
(%)	0,4	4,0	8,5	29,8	44,8	11,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	4,0	4,2	5,4	6,2	7,3	7,8	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	4,0	5,8	6,6	10,5	10,7	10,8	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela E2 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JASOND (inverno) para o cenário de maior massa na costa, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
4,0-6,0	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8
6,0-8,0	0,00	0,00	0,00	3,23	3,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,9
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	9,68	16,13	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,2
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	5,65	29,84	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,4
12,0-14,0	0,00	0,00	0,00	0,81	12,10	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,9
14,0-16,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8
(%)	0,0	0,0	0,0	19,8	62,9	17,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,0	0,0	0,0	9,3	10,7	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	0,0	0,0	0,0	12,8	14,5	12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

DET_MASSA_BAR_M_346_PC_JFMAM



DET_MASSA_BAR_M_346_PC_JASOND

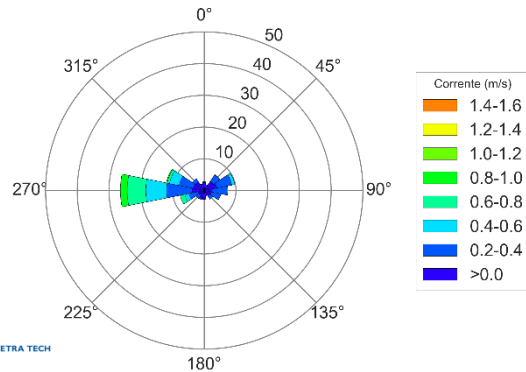


Figura E2 – Rosas de corrente a partir dos dados do modelo DELFT3D para os cenários determinísticos de maior massa na costa. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E3 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de maior massa na costa, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	1,09	1,25	3,18	5,63	4,22	4,48	3,34	2,55	1,46	1,15	1,20	2,19	3,02	2,45	2,08	1,25	40,5
0,2-0,4	0,73	0,52	1,93	5,05	5,37	2,03	1,15	1,51	0,89	0,26	1,82	5,42	8,96	3,18	1,30	0,42	40,5
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,99	1,88	0,00	0,16	0,47	0,26	0,00	0,83	4,27	4,27	0,42	0,00	0,00	13,5
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	1,93	0,00	0,00	0,00	3,6
0,8-1,0	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	0,10	0,00	0,00	1,7
(%)	1,82	1,77	5,11	12,98	11,46	6,51	4,64	4,53	2,61	1,41	3,86	12,40	19,70	6,15	3,39	1,67	
Média	0,18	0,14	0,18	0,28	0,26	0,16	0,16	0,20	0,21	0,12	0,28	0,35	0,40	0,26	0,19	0,16	
Máximo	0,35	0,30	0,37	0,81	0,54	0,36	0,41	0,51	0,53	0,30	0,55	0,80	0,99	0,83	0,39	0,37	

Tabela E4 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JASOND (inverno) para o cenário de maior massa na costa, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	2,49	1,14	3,43	4,03	2,49	2,22	2,15	1,61	2,76	2,62	1,95	1,95	3,83	3,49	3,29	2,08	41,5
0,2-0,4	0,27	0,74	2,55	4,84	4,70	3,09	1,14	0,13	0,00	0,34	1,14	2,96	8,06	4,57	1,21	0,07	35,8
0,4-0,6	0,00	0,00	0,07	0,94	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	6,52	3,09	0,00	0,00	12,2
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,48	5,85	0,74	0,00	0,00	8,1
0,8-1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15	0,27	0,00	0,00	2,4
(%)	2,76	1,88	6,05	9,81	7,39	5,31	3,29	1,75	2,76	2,96	3,09	7,73	26,41	12,16	4,50	2,15	
Média	0,14	0,19	0,19	0,22	0,25	0,19	0,15	0,10	0,12	0,12	0,16	0,36	0,45	0,34	0,15	0,10	
Máximo	0,33	0,37	0,41	0,51	0,44	0,35	0,31	0,27	0,20	0,26	0,36	0,74	0,92	0,84	0,38	0,26	

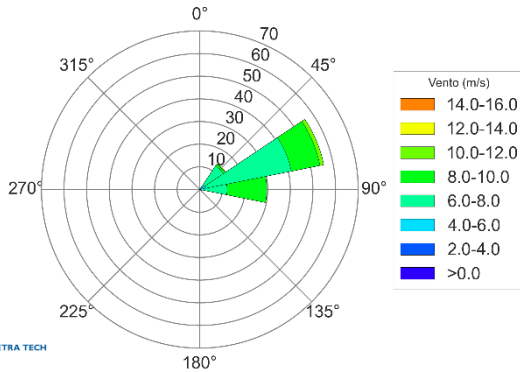


E.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS DE MENOR TEMPO

A Figura E3 apresenta as rosas dos ventos para os cenários de menor tempo de toque na costa para os períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita). Durante o verão os ventos mais frequentes são de ENE, enquanto no inverno são de E. A Tabela E5 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos para período representativo do verão, com ventos mais frequentes de ENE (55,8%) e E (29,65%), velocidades mais frequentes entre 6 m/s e 10 m/s e máxima de 10,8 m/s na direção ESE. Analogamente, a Tabela E6 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta para o período de inverno, onde os ventos mais frequentes são de E (62,9%) e ENE (19,8%), as velocidades mais frequentes entre 8 m/s e 12 m/s e a velocidade máxima de 14,5 m/s na direção E.

A Figura E4 apresenta as rosas de corrente a partir do modelo DELFT3D para os períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita). Em ambos os períodos as correntes predominantes são para W, devido a predominância da Corrente Norte do Brasil na região. A Tabela E7 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção das correntes para o cenário de verão, enquanto a Tabela E8 apresenta o mesmo para o inverno. Observa-se no período de verão correntes predominantes para W (36,53%) e WNW (12,36%), com intensidades predominantes de até 0,4 m/s e máxima intensidade de 0,74 m/s na direção W. No período de inverno as correntes predominantes se mantêm para W (26,95%), porém com inversões para E (11,29%). As velocidades mais frequentes permanecem abaixo de 0,4 m/s e a máxima ocorre na direção W, atingindo 0,93 m/s.

DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_JFMAM



DET_TEMPO_BAR_M_346_PC_JASOND

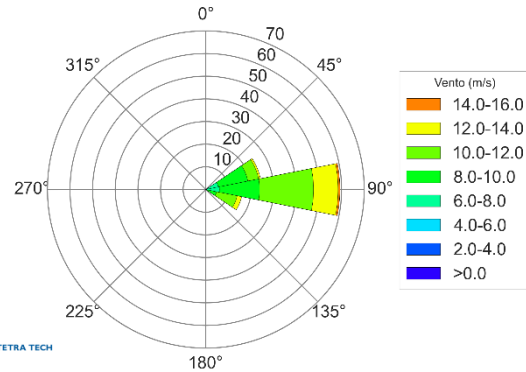


Figura E3 – Rosas de vento a partir dos dados da reanálise CFSv2 para os cenários determinísticos de menor tempo de toque na costa. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E5 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor tempo de toque na costa, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
4,0-6,0	0,00	0,00	2,08	2,92	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,7
6,0-8,0	0,00	0,00	10,42	38,33	10,42	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,6
8,0-10,0	0,00	0,00	0,83	12,92	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,3
10,0-12,0	0,00	0,00	0,42	1,67	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,5
(%)	0,0	0,0	13,8	55,8	29,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,0	0,0	6,9	7,4	8,1	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	0,0	0,0	10,3	10,6	10,0	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela E6 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor tempo de toque na costa, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
4,0-6,0	0,00	0,00	0,00	0,81	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,2
6,0-8,0	0,00	0,00	0,00	4,84	5,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,5
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	13,31	17,74	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,9
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	4,84	23,79	9,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,9
12,0-14,0	0,00	0,00	0,00	0,81	10,89	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,7
14,0-16,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8
(%)	0,0	0,0	0,0	24,6	59,3	16,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,0	0,0	0,0	9,0	10,4	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	0,0	0,0	0,0	12,8	14,5	12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

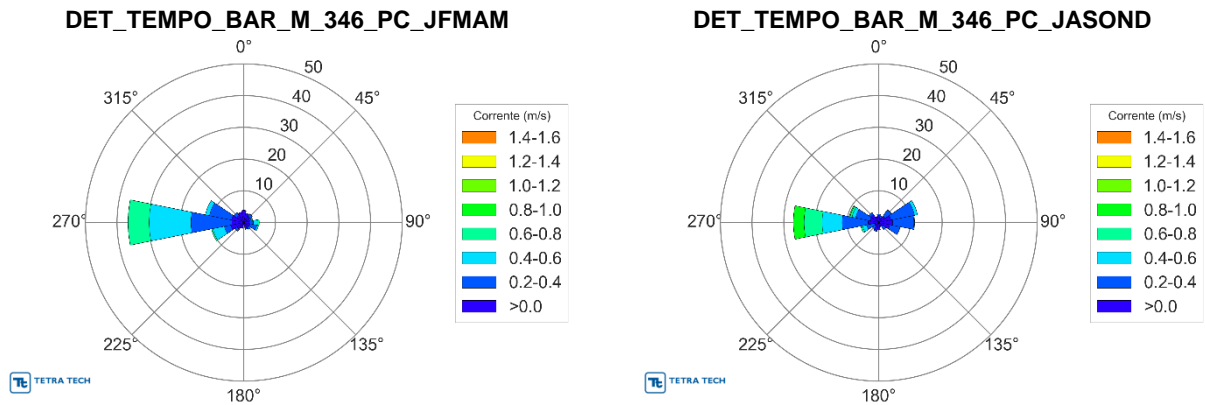


Figura E4 – Rosas de corrente a partir dos dados do modelo DELFT3D para os cenários determinísticos de menor tempo de toque na costa. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E7 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor tempo de toque na costa, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	3,82	2,71	2,29	1,94	1,81	2,01	1,88	1,94	0,76	1,67	2,57	4,17	3,82	3,96	2,71	3,33	41,4
0,2-0,4	0,00	0,28	0,97	0,49	1,18	2,22	0,76	0,28	0,21	0,21	0,76	2,08	12,85	7,08	1,11	0,00	30,5
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,28	1,53	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,68	13,19	1,32	0,00	0,00	20,5
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,21	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	6,67	0,00	0,00	0,00	7,6
(%)	3,82	2,99	3,26	2,92	4,86	4,72	2,64	2,22	0,97	1,88	3,33	10,35	36,53	12,36	3,82	3,33	
Média	0,12	0,13	0,17	0,23	0,32	0,22	0,18	0,15	0,17	0,13	0,14	0,32	0,43	0,27	0,16	0,12	
Máximo	0,20	0,21	0,25	0,68	0,64	0,52	0,38	0,26	0,25	0,21	0,26	0,68	0,74	0,53	0,31	0,19	

Tabela E8 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor tempo de toque na costa, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	2,35	1,55	2,35	3,90	4,37	3,56	1,61	1,28	2,35	2,55	1,48	1,34	3,36	2,82	3,09	1,88	39,9
0,2-0,4	0,27	0,54	2,42	7,59	6,72	3,29	1,14	0,13	0,00	0,34	1,01	2,55	8,20	4,64	0,74	0,07	39,7
0,4-0,6	0,00	0,00	0,07	0,94	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	6,32	1,14	0,00	0,00	10,0
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	5,71	0,60	0,00	0,00	6,9
0,8-1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36	0,27	0,00	0,00	3,6
(%)	2,62	2,08	4,84	12,43	11,29	6,85	2,76	1,41	2,35	2,89	2,49	5,78	26,95	9,48	3,83	1,95	
Média	0,14	0,19	0,21	0,23	0,23	0,19	0,16	0,09	0,11	0,12	0,17	0,34	0,48	0,31	0,14	0,11	
Máximo	0,33	0,37	0,41	0,51	0,44	0,35	0,31	0,27	0,20	0,26	0,36	0,71	0,93	0,84	0,33	0,26	

E.3 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS DE MENOR DISTANCIA

A Figura E5 apresenta as rosas dos ventos a partir dos dados da CFS-v2 para os períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita), referentes ao cenário determinístico de menor distancia com volume de 8 m³. Em ambos os períodos os ventos mais frequentes são de leste, sendo mais intensos no inverno do que o verão. Similarmente, a Figura E8 apresenta as rosas para os dois períodos sazonais para os cenários com volume de 200 m³. Nesse caso, durante o verão os ventos predominantes são de ENE e durante o inverno são de E.

A Tabela E9 apresenta o digrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos para o período de verão no cenário de 8 m³ e a Tabela E13 apresenta o análogo para cenário com volume de 200 m³. No cenário de menor volume os ventos predominantes são de E (46,1%) e ENE (26,6%), com velocidades predominantes entre 4,0 e 8,0 m/s e máxima de 10,7 m/s na direção E. No cenário de maior volume os ventos predominantes são de ENE (50,8%) e E (31,7%), com velocidades predominantes entre 6,0 m/s e 10,0 m/s e máxima de 10,5 na direção ENE.

Para o período de inverno a Tabela E10 e a Tabela E14 descrevem a ocorrência conjunta, respectivamente para os cenários de 8 m³ e 200 m³. No cenário de menor volume os ventos predominantes são de E (67,2%) e ENE (29,7%), com a faixa de intensidades mais frequentes ente 8,0 m/s e 12,0 m/s e máxima intensidade de 13,5 na direção E. No cenário de maior volume os ventos predominantes também são de E (62,5%) e ENE (31,3%), com velocidades predominantes e máxima análogas às do cenário de 8 m³.

Com relação às correntes, a Figura E7 apresenta as rosas direcionais a partir dos dados do modelo DELFT3D para o cenário de menor distância da costa nos períodos de JFMAMJ (verão, à esquerda) e JASOND (inverno, à direita) no cenário de volume 8 m³, e a Figura E9 apresenta o análogo para o cenário de volume 200 m³.

A Tabela E11 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção das correntes para o cenário determinístico de menor distancia com volume de 8 m³ no período de verão, e a Tabela E15 apresenta o mesmo para o volume de 200 m³. No cenário de menor volume as correntes predominantes são para W (25,43%) e WSW (18,62%), com intensidades mais frequentes na até 0,4 m/s e máxima de 0,99 m/s na direção W. No cenário de maior volume as correntes predominantes também são para W (38,06%) e WSW

(20,0%), com velocidades predominantes na mesma faixa e máxima para W atingindo 0,74 m/s.

Para o período de inverno, o análogo é apresentado na Tabela E12 (cenário de 8 m²) e Tabela E16 (cenário de 200 m³). No caso de menor volume as correntes predominantes são para W (37,24%) e WNW (18,36%), com velocidades predominantes até 0,4 m/s e máxima de 0,63 na direção WSW. No cenário de maior volume as correntes predominantes são de W (34,46%) e WNW (19,27%), com velocidades mais frequentes e máximas iguais às do cenário de menor volume.

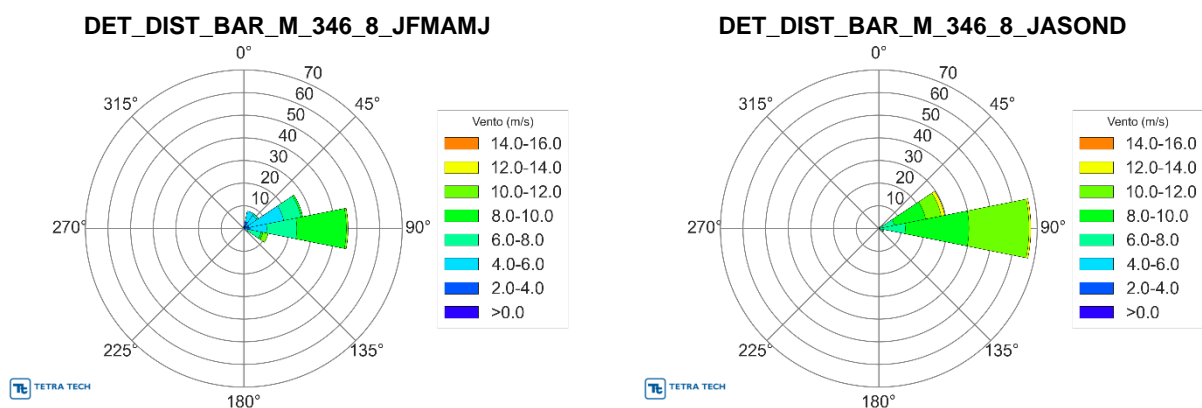


Figura E5 – Rosas de vento a partir dos dados da reanálise CFSv2 para os cenários determinísticos de menor distancia da costa com volume de 8 m³. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E9 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor distância com volume de 8 m³, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,78	3,13	1,56	2,34	3,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,9
4,0-6,0	0,00	4,69	5,47	15,63	7,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,8
6,0-8,0	0,00	0,00	0,78	7,81	13,28	7,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,7
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	0,78	21,88	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,4
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	2,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,1
(%)	0,8	7,8	7,8	26,6	46,1	10,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Média	4,0	4,2	5,2	5,5	7,4	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Máximo	4,0	5,8	6,3	8,0	10,7	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Tabela E10 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor distância com volume de 8 m³, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8
4,0-6,0	0,00	0,00	0,78	0,78	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,3
6,0-8,0	0,00	0,00	0,00	6,25	10,16	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,2
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	14,06	28,13	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,8
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	7,03	26,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,6
12,0-14,0	0,00	0,00	0,00	1,56	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,3
(%)	0,0	0,0	0,8	29,7	67,2	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Média	0,0	0,0	5,7	9,1	9,5	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Máximo	0,0	0,0	5,7	12,8	13,5	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

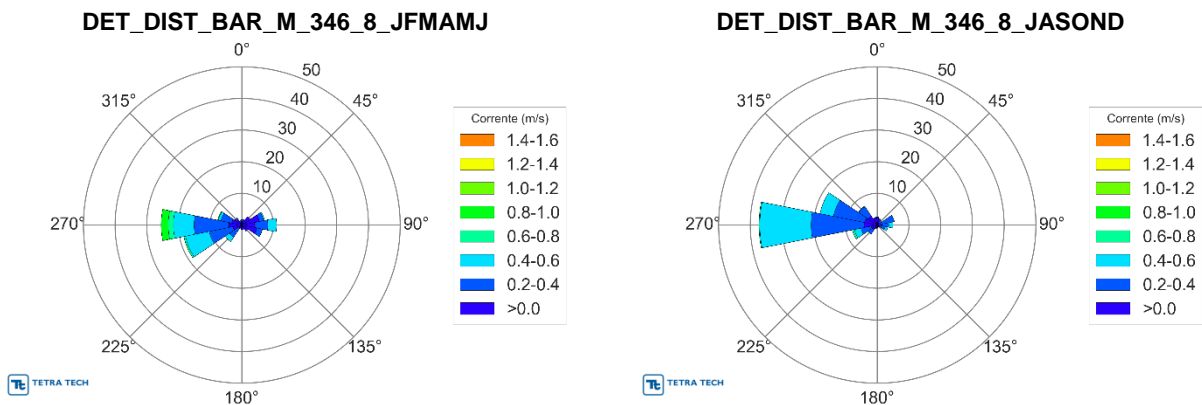


Figura E6 – Rosas de corrente a partir dos dados do modelo DELFT3D para cenários determinísticos de menor distância da costa com volume de 8 m³. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E11 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor distância com volume de 8m³, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	1,12	1,42	3,15	5,70	4,17	4,88	2,14	1,42	1,42	1,12	1,12	2,85	4,07	3,26	2,14	1,02	41,0
0,2-0,4	0,51	0,41	0,00	1,32	4,07	1,73	0,20	0,00	0,00	0,00	3,56	7,63	10,99	3,46	0,51	0,41	34,8
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,31	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,63	7,63	6,51	0,81	0,00	0,00	19,6
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	1,63	0,00	0,00	0,00	2,1
0,8-1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,24	0,20	0,00	0,00	2,4
(%)	1,63	1,83	3,15	7,32	10,99	6,61	2,34	1,42	1,42	1,12	6,31	18,62	25,43	7,73	2,64	1,42	
Média	0,16	0,13	0,12	0,18	0,28	0,15	0,10	0,11	0,11	0,09	0,31	0,36	0,40	0,27	0,17	0,16	
Máximo	0,21	0,23	0,19	0,43	0,54	0,27	0,21	0,18	0,17	0,15	0,55	0,72	0,99	0,83	0,28	0,24	



Tabela E12 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor distância com volume de 8 m³, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	2,34	1,69	0,78	0,91	1,43	0,78	0,78	0,65	0,65	1,04	1,95	1,95	4,17	4,04	3,39	2,21	28,8
0,2-0,4	0,13	0,39	0,78	4,56	2,21	1,82	0,00	0,00	0,13	0,26	1,56	3,26	16,67	10,03	3,65	0,13	45,6
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08	16,15	4,30	0,13	0,00	24,7
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,26	0,00	0,00	0,00	0,9
(%)	2,47	2,08	1,56	5,47	4,95	3,39	0,78	0,65	0,78	1,30	3,52	7,94	37,24	18,36	7,16	2,34	
Média	0,13	0,17	0,19	0,26	0,31	0,30	0,11	0,12	0,13	0,18	0,20	0,34	0,38	0,31	0,21	0,14	
Máximo	0,21	0,23	0,29	0,39	0,51	0,43	0,17	0,16	0,20	0,30	0,36	0,63	0,61	0,55	0,40	0,20	

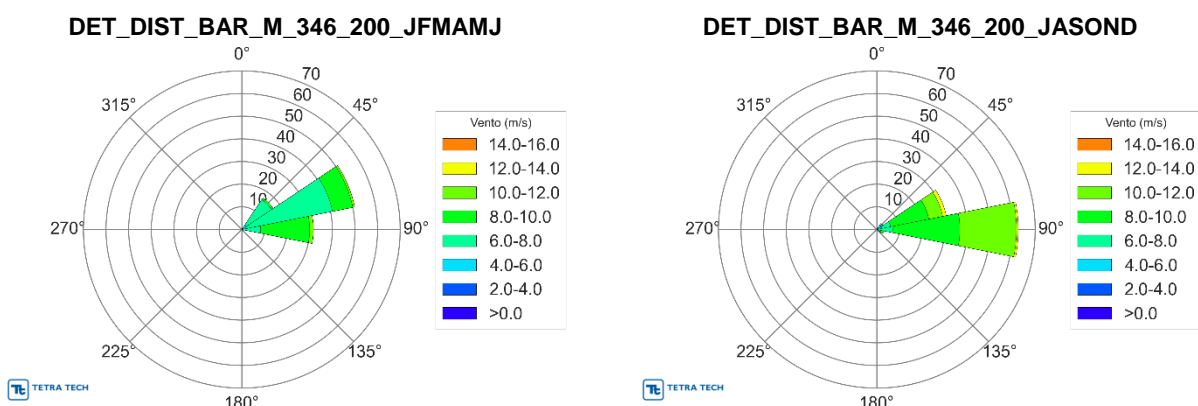


Figura E7 – Rosas de vento a partir dos dados da reanálise CFSv2 para os cenários determinísticos de menor distancia da costa com volume de 200 m³. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E13 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor distância com volume de 200 m³, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
4,0-6,0	0,00	0,00	2,50	2,50	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,8
6,0-8,0	0,00	0,00	13,33	38,33	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,0
8,0-10,0	0,00	0,00	0,83	9,17	21,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,7
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	0,83	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,5
(%)	0,0	0,0	16,7	50,8	31,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Média	0,0	0,0	6,9	7,2	8,6	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Máximo	0,0	0,0	8,0	10,5	10,2	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Tabela E14 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do vento para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor distância com volume de 200m³, a partir da reanálise CFSv2.

Vento (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
2,0-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,8
4,0-6,0	0,00	0,00	2,34	2,34	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,5
6,0-8,0	0,00	0,00	0,78	3,91	5,47	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,7
8,0-10,0	0,00	0,00	0,00	17,19	29,69	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,4
10,0-12,0	0,00	0,00	0,00	6,25	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,3
12,0-14,0	0,00	0,00	0,00	1,56	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,3
(%)	0,0	0,0	3,1	31,3	62,5	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Média	0,0	0,0	5,8	9,0	9,7	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Máximo	0,0	0,0	7,3	12,8	13,5	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

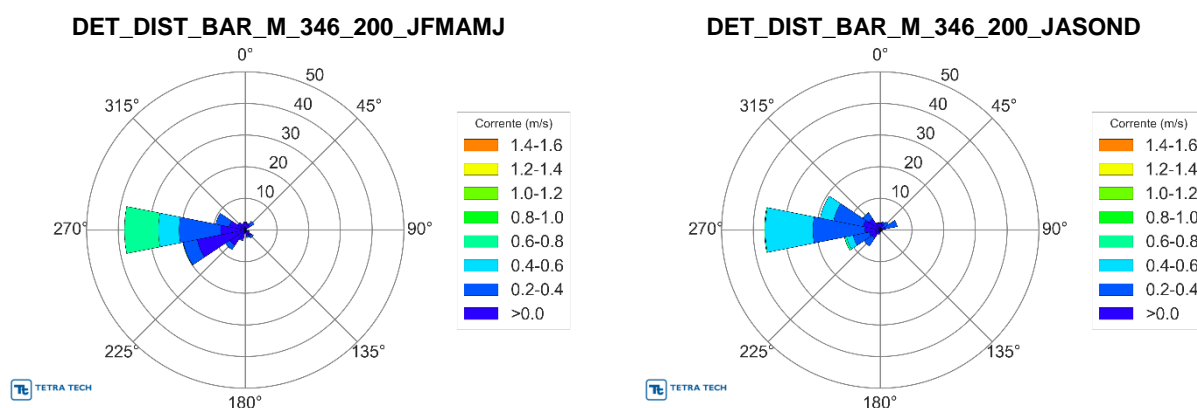


Figura E8 – Rosas de corrente a partir dos dados do modelo DELFT3D para cenários determinísticos de menor distância da costa com volume de 200 m³. Período de JFMAMJ (verão) à esquerda e JASOND (inverno) à direita.

Tabela E15 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JFMAMJ (verão) para o cenário de menor distância com volume de 200 m³, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	2,50	2,22	1,94	0,14	0,14	0,97	2,22	1,94	0,83	3,06	5,83	15,42	7,78	5,14	2,92	2,08	55,1
0,2-0,4	0,00	0,00	1,39	0,00	0,00	0,42	0,83	0,56	0,42	0,42	1,67	4,44	13,06	4,31	0,00	0,00	27,5
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,53	0,00	0,00	0,00	6,5
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	10,69	0,00	0,00	0,00	10,8
(%)	2,50	2,22	3,33	0,14	0,14	1,39	3,06	2,50	1,25	3,47	7,50	20,00	38,06	9,44	2,92	2,08	
Média	0,09	0,09	0,18	0,02	0,02	0,14	0,18	0,17	0,18	0,13	0,14	0,17	0,40	0,20	0,10	0,08	
Máximo	0,12	0,14	0,23	0,02	0,02	0,23	0,24	0,26	0,25	0,21	0,26	0,68	0,74	0,38	0,17	0,10	



Tabela E16 – Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção da corrente para o período de JASOND (inverno) para o cenário de menor distância com volume de 200 m³, a partir do modelo DELFT3D.

Corrente (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	(%)
0,0-0,2	2,21	2,08	0,78	1,82	0,65	0,65	0,26	0,26	0,52	1,04	3,13	3,52	4,82	5,47	4,30	2,34	33,9
0,2-0,4	0,13	0,52	2,34	3,65	0,13	0,00	0,00	0,00	0,13	0,39	2,99	5,21	16,41	9,51	2,21	0,13	43,8
0,4-0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08	14,97	4,30	0,13	0,00	21,5
0,6-0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,26	0,00	0,00	0,00	0,9
(%)	2,34	2,60	3,13	5,47	0,78	0,65	0,26	0,26	0,65	1,43	6,12	11,46	36,46	19,27	6,64	2,47	
Média	0,13	0,16	0,23	0,24	0,14	0,12	0,06	0,08	0,14	0,18	0,22	0,30	0,37	0,29	0,18	0,14	
Máximo	0,21	0,23	0,36	0,37	0,22	0,19	0,08	0,09	0,20	0,30	0,39	0,63	0,61	0,55	0,40	0,20	